



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Estudio del comportamiento de la capa de balasto en vías
de tres carriles aplicando el método de los elementos
discretos. Aplicación a la línea entre Valencia y Sagunto.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

AUTOR/A: Molina Cabrera, Daniel

Tutor/a: Villalba Sanchis, Ignacio

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a Ricardo Insa ya que gracias a él empecé a adentrarme en el mundo del ferrocarril y a día de hoy eso ha conllevado a la realización de este Trabajo Final de Grado.

También agradecer a mi tutor Ignacio Villalba ya que todo este tiempo ha estado ahí apoyándome y ayudándome para poder realizar el presente trabajo.

Agradecer también a Pablo Salvador con el cual he pasado buenos momentos montando los sensores para poder realizar mediciones en la vía.

En general, agradecer a todo el departamento de ingeniería e infraestructura de los transportes, con especial interés a los dedicados al mundo ferroviario, por dejarme formar parte del grupo del cual estoy muy contento de haber ayudado.

Por último y no por ello menos importante, agradecer a mi familia por mostrarme siempre su apoyo, sus conocimientos y siempre haber confiado en mí.



RESUMEN

En el campo ferroviario, dada la complejidad de la capa de balasto a las diversas solicitaciones, se han realizado numerosas investigaciones que utilizan la suposición de materiales continuos, empleando para ello el Método de Elementos Finitos. No obstante, la capa de balasto está constituida por un conjunto de partículas granulares las cuales están sujetas a solicitaciones dinámicas cuyo comportamiento difiere mucho del que presentaría un material continuo.

Por tanto, para entender el comportamiento de la capa de balasto es necesario avanzar en la modelización de un modelo que sea capaz de representar las discontinuidades de un material granular como es el balasto. Por lo tanto, el siguiente documento llevará a cabo un análisis del comportamiento de la capa de balasto frente a la aplicación de distintas cargas, empleando un modelo basado en el Método de Elementos Discretos que se modificará, validará y aplicará a una vía de tres carriles, es decir, el modelo se computará tanto para ancho estándar como para ancho ibérico. Dicho modelo tendrá una aplicación práctica real al tramo ferroviario Valencia – Sagunto.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	6
ÍNDICE DE TABLAS	14
1 INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 Antecedentes	16
1.2 Alcance	17
1.3 Propósitos	18
2 ESTADO DE LA TÉCNICA	19
2.1 Modelización computacional del balasto.....	19
2.1.1 Método de Elementos Finitos	19
2.1.2 Método de Elementos Discretos	19
2.2 Estructura de la partícula de balasto	20
2.2.1 Circular y cúmulos circulares	21
2.2.2 Esferas	22
2.2.3 Cúmulos de esferas	22
2.2.4 Poliedros	25
2.2.5 Elementos potenciales.....	26
2.3 Modelos de contacto	27
2.3.1 Modelos para partículas circulares y esféricas	28
2.3.2 Modelos para formas poliédricas.....	29
2.4 Fractura del balasto	30
2.4.1 Fractura del enlace de un cumulo de partículas	30
2.4.2 Fragmentación de una partícula en otras más pequeñas	31
2.5 Cargas dinámicas sobre la capa de balasto	32
3 METODOLOGÍA.....	35
3.1 Descripción general	35
3.2 Obtención de la rigidez de la capa de balasto.....	35
3.2.1 Localización del tramo de estudio.....	36
3.2.2 Calibración de los sensores de medición	36
3.2.3 Realización del ensayo de campo	38
3.3 Simulación numérica	39
3.3.1 Configuración del modelo	40
3.3.2 Preparación del balasto.....	41
3.3.3 Parametrización del modelo	41

3.3.4	Calibración y comprobación del modelo	42
3.4	Casos de carga a estudiar	42
4	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL TRAMO DE ESTUDIO	44
4.1	Marco general	44
4.2	Valor estratégico	45
4.3	Superestructura	46
4.3.1	Sección transversal	46
4.3.2	Balasto	47
4.3.3	Traviesas	47
4.3.4	Carriles	49
4.4	Tipologías de tráfico	50
4.4.1	Servicio de cercanías	50
4.4.2	Servicio de Media Distancia	51
4.4.3	Servicio de Larga Distancia	53
4.4.4	Transporte de mercancías	56
5	MODELO COMPUTACIONAL	58
5.1	Caracterización del modelo	58
5.1.1	Disposición geométrica	58
5.1.2	Capa de Balasto	60
5.1.3	Traviesas	62
5.2	Premisas iniciales	63
5.2.1	Variables de la simulación	63
5.2.2	Patrón de contacto	64
5.2.3	Materiales	64
5.2.4	Condiciones de contorno	66
5.3	Proceso de preparación del modelo	66
5.3.1	Fase 1: Generación y colocación del balasto	67
5.3.2	Fase 2: Compactación cíclica	68
5.3.3	Fase 3: Colocación de la traviesa y del balasto de alrededor	69
5.3.4	Fase 4: Formación de los taludes	69
5.4	Aplicación de las cargas	69
5.4.1	Distribución de la carga a las traviesas	69
5.4.2	Carga estática	71
5.4.3	Carga diferencial	71
5.4.4	Carga cuasi – estática	72
5.4.5	Carga dinámica	73

5.4.6	Carga lateral: STPT	76
6	APLICACIÓN PRÁCTICA AL TRAMO DE ESTUDIO	77
6.1	Verificación	77
6.2	Solicitud estática	79
6.2.1	Caracterización	79
6.2.2	Descenso de la traviesa.....	80
6.2.3	Desplazamiento de las partículas de balasto	81
6.2.4	Velocidad de las partículas de balasto	88
6.2.5	Cadena de fuerzas en la capa de balasto	91
6.3	Solicitud estática con carga diferencial	93
6.3.1	Caracterización	93
6.3.2	Descenso de la traviesa.....	94
6.3.3	Desplazamiento de las partículas de balasto	97
6.3.4	Velocidad de las partículas de balasto	103
6.3.5	Cadena de fuerzas	105
6.4	Solicitud cuasi – estática	108
6.4.1	Caracterización	108
6.4.2	Caso 1: Velocidad de 80 km/h.....	109
6.4.2.1	Descenso de la traviesa	109
6.4.2.2	Desplazamiento de las partículas de balasto	110
6.4.2.3	Velocidad de las partículas de balasto	115
6.4.2.4	Cadena de fuerzas.....	118
6.4.3	Caso 2: Velocidad de 160 km/h.....	120
6.4.3.1	Descenso de la traviesa	120
6.4.3.2	Desplazamiento de las partículas de balasto	121
6.4.3.3	Velocidad de las partículas de balasto	127
6.4.3.4	Cadena de fuerzas.....	130
6.5	Solicitud dinámica	131
6.5.1	Caracterización	131
6.5.2	Caso 1: Serie 447	132
6.5.2.1	Descenso de la traviesa	132
6.5.2.2	Desplazamiento de las partículas de balasto	134
6.5.2.3	Velocidad de las partículas de balasto	142
6.5.2.4	Cadena de fuerzas.....	145
6.5.3	Caso 2: Serie 130	147
6.5.3.1	Descenso de la traviesa	147
6.5.3.2	Desplazamiento de las partículas de balasto	149



6.5.3.3	Velocidad de las partículas de balasto	156
6.5.3.4	Cadena de fuerzas.....	159
7	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	162
8	CONCLUSIONES	164
8.1	Recopilación de resultados	164
8.2	Limitaciones de la modelización	166
8.3	Cumplimiento de los objetivos propuestos	167
9	BIBLIOGRAFÍA	169
	ANEJOS.....	175
	ANEJO N°1: Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	176
	ANEJO N°2: Plano de la travesía AM-05.....	178

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Representación gráfica del número de artículos publicados cada año sobre la modelización del balasto utilizando el Método de Elementos Discretos. (Base de datos Scopus).....	20
Ilustración 2. Representación del balasto circular a la izquierda y del conjunto circular de balasto a la derecha. (Ngamkhanong et al., 2017).....	21
Ilustración 3. Representación de una esfera independiente (izquierda) y de un cúmulo de esferas (a la derecha). (Ngamkhanong et al., 2017.).....	23
Ilustración 4. Muestra del segundo set de cúmulos y su correlación con los descriptores de forma. (Suhr & Six, 2020)	24
Ilustración 5. Fases del proceso para la recreación de los cúmulos de esferas para simular la piedra de balasto. (Adaptación de Zhang et al., 2017)	24
Ilustración 6. Ejemplos de piedras de balasto creadas por teselación de Voronoi. Por cada cuerpo se muestra su vista frontal (A), lateral (B) e inferior (C). (Eliáš, 2013).	25
Ilustración 7. Proceso del ensayo edométrico realizado sobre el balasto con YADE. De izquierda a derecha se representan las tres fases del ensayo. (Eliáš, 2013)	26
Ilustración 8. Muestra a la izquierda de ejemplos de elementos potenciales de balasto y a la derecha la colocación aleatoria de estos para realizar el ensayo triaxial. (Adaptación de Ahmed et al., 2016).....	27
Ilustración 9. Muestra del plano común (CP) entre dos piedras de balasto. A la izquierda piedras en contacto y a la derecha piedras que no intersecan en el plano estando por lo tanto sin contacto entre ellas. (Nezami et al., 2006)	29
Ilustración 10. Etapas para simular el proceso de fractura de una partícula esférica en otras más pequeñas. (Lobo-Guerrero & Vallejo, 2006).	31
Ilustración 11. Muestra de la división de la piedra en dos mitades, opción que fue descartada (a) y división de la partícula en cuatro mitades menores, opción adoptada finalmente (b). (Eliáš, 2014)	32
Ilustración 12. Gráfica donde se representa el esfuerzo desviador de 374 kPa con una frecuencia de 10 Hz. (Indraratna et al., 2010).....	33
Ilustración 13. Gráfica donde se representa la variación de la fuerza transmitida en función del tiempo en la iteración traviesa y carril. (Zhang et al., 2017).....	34
Ilustración 14. Representación de un Serie 100 de Renfe. Cotas en metros. (Irazábal González, 2017)	34

Ilustración 15. Representación de la metodología llevada a cabo para el desarrollo del modelo. (Elaboración propia)	35
Ilustración 16. Ortofotografía de la estación de Massalfassar. (Elaboración propia a partir de Google Earth)	36
Ilustración 17. Representación del proceso de calibrado de los sensores potenciométricos en laboratorio. (Elaboración propia).....	37
Ilustración 18. Ordenador conectado a la prensa eléctrica para el monitoreo de esta y la recogida de datos. (Elaboración propia)	38
Ilustración 19. Material empleado para la realización del ensayo de campo para la recogida de datos. (Elaboración propia).....	39
Ilustración 20. Esquema seguido para la creación del modelo de simulación numérica. (Elaboración propia)	39
Ilustración 21. Diagrama del proceso de colocación del balasto en obra. (Elaboración propia) .	41
Ilustración 22. Red de las principales conexiones y estaciones en las que interviene el tramo de estudio. De color amarillo se ha representado el tramo de estudio. (Elaboración propia).....	45
Ilustración 23. Sección transversal de una vía de ancho mixto. (Adif)	46
Ilustración 24. Tramo de la vía en donde se aprecian las traviesas AM-05 y la vía de tres carriles. (Elaboración propia)	48
Ilustración 25. Representación de las sujeciones de la zona de doble carril de la traviesa y tabla con su descripción. (Escola de Camins UPC)	49
Ilustración 26. Sección transversal con las dimensiones geométricas de un carril 60 E1. (Adif)	49
Ilustración 27. Representación geométrica del Elemento Fundamental del modelo. Vista en planta y vista en alzado, superior e inferior respectivamente. Unidades en milímetros. (Elaboración propia)	59
Ilustración 28. Muestra esquematizada de los tres tipos de cúmulos contemplados. Imagen de la izquierda, construcción de las esferas sin solape, imagen central, construcción con solape e imagen derecha, solape mínimo entre esferas. (Suhr & Six, 2020).....	60
Ilustración 29. Comparativa de los principales descriptores de forma entre las partículas de balasto (amarillo) y los sets de clumps de cada una de las tres colecciones. (Suhr & Six, 2020)	61
Ilustración 30. Representación del alzado del modelo de la traviesa en función del ancho de vía. Imagen superior vía de ancho estándar, imagen inferior vía de ancho ibérico. (Elaboración propia)	63
Ilustración 31. Fases de preparación para la generación del modelo. (Elaboración propia)	67

Ilustración 32. Reparto de una carga a lo largo de un emparrillado hacia la capa de balasto. (Koivisto et al.,2009)	70
Ilustración 33. Gráfica representativa de la distribución de la carga de un eje de tren sobre una traviesa. (Elaboración propia)	74
Ilustración 34. Gráfica representativa de la distribución de cargas sobre la traviesa producida por un Serie 447. (Elaboración propia)	75
Ilustración 35. Gráfica representativa de la distribución de cargas sobre la traviesa producida por la cabeza motora de la Serie 130. (Elaboración propia)	75
Ilustración 36. Gráfica comparativa entre el descenso de la traviesa en ancho ibérico y en ancho estándar. (Elaboración propia)	81
Ilustración 37. Proceso de evolución del desplazamiento tridimensional de las partículas de balasto en ancho ibérico. (Elaboración propia)	82
Ilustración 38. Evolución del desplazamiento tridimensional de las partículas de balasto en ancho estándar. (Elaboración propia)	83
Ilustración 39. Vista en planta del desplazamiento vertical de las partículas de balasto. Comparativa entre ancho ibérico (superior) frente al ancho estándar (inferior). (Elaboración propia)	84
Ilustración 40. Vista en alzado del desplazamiento vertical de las partículas de balasto. Comparativa entre ancho ibérico (superior) y ancho estándar (inferior). (Elaboración propia)	85
Ilustración 41. Corte longitudinal por el centro de la capa de balasto. Comparación de los desplazamientos verticales entre ancho ibérico (arriba) y ancho estándar (abajo). (Elaboración propia)	86
Ilustración 42. Vista en planta de la comparativa del desplazamiento horizontal del balasto entre ambos anchos. (Elaboración propia)	87
Ilustración 43. Vista en alzado de la comparativa del desplazamiento horizontal del balasto entre ambos anchos. (Elaboración propia)	88
Ilustración 44. Velocidades de las partículas de balasto en ancho ibérico en los primeros instantes de aplicación de la carga. (Elaboración propia)	89
Ilustración 45. Velocidades de las partículas de balasto en ancho estándar en los primeros instantes de aplicación de la carga. (Elaboración propia)	90
Ilustración 46. Representación de un corte longitudinal al balasto por el centro de la capa. Comparativa de las velocidades de las partículas entre ambos anchos de vía. (Elaboración propia)	91

Ilustración 47. Representación en alzado de la fuerza normal entre partículas en ancho ibérico (superior) y en ancho estándar (inferior). (Elaboración propia).....	92
Ilustración 48. Representación en planta de la fuerza normal entre partículas en ancho ibérico (superior) y en ancho estándar (inferior). (Elaboración propia).....	93
Ilustración 49. Gráfico representativo del descenso de la traviesa en función del ancho de vía tras la aplicación de una carga diferencial. (Elaboración propia).....	95
Ilustración 50. Representación del descenso del lado más cargado de la traviesa en ancho ibérico y en ancho estándar. (Elaboración propia)	96
Ilustración 51. Comparativa del descenso del lado izquierdo de la traviesa en ancho ibérico y en ancho estándar. (Elaboración propia).....	96
Ilustración 52. Serie de desplazamientos tridimensionales de las partículas de balasto tras la acción de una carga diferencial en ancho ibérico. (Elaboración propia)	98
Ilustración 53. Serie de desplazamientos tridimensionales de las partículas de balasto tras la acción de una carga diferencial en la vía de ancho estándar. (Elaboración propia) .	99
Ilustración 54. Vista en planta de los desplazamientos verticales de las partículas de balasto tras una carga diferencial. Comparativa entre ancho ibérico (superior) y ancho estándar. (Elaboración propia)	100
Ilustración 55. Vista en alzado de los desplazamientos verticales del balasto tras una carga diferencial. Comparativa entre ancho ibérico (superior) y ancho estándar (inferior). (Elaboración propia)	101
Ilustración 56. Comparativa en planta de los desplazamientos horizontales de las partículas de balasto en función del ancho de vía. (Elaboración propia).....	102
Ilustración 57. Comparativa en alzado de los desplazamientos horizontales del balasto en función del ancho de vía. (Elaboración propia)	103
Ilustración 58. Serie de las velocidades de las partículas de balasto en ancho ibérico. (Elaboración propia).....	104
Ilustración 59. Secuencia de las velocidades de las partículas de balasto en ancho estándar. (Elaboración propia)	105
Ilustración 60. Comparativa de ambos anchos de vía en alzado de la fuerza normal entre las partículas de balasto a mitad del proceso de aplicación de la carga. (Elaboración propia).....	106
Ilustración 61. Comparativa en alzado de las cadenas de fuerzas normales en la capa de balasto en el momento de máxima aplicación de la carga. (Elaboración propia)	107
Ilustración 62. Comparativa en planta de las cadenas de fuerzas normales en la capa de balasto en el momento de máxima aplicación de la carga. (Elaboración propia)	108

Ilustración 63. Gráfica representativa del descenso producido por la carga mayorada por el criterio de Eisenmann en función del ancho de vía. (Elaboración propia)	109
Ilustración 64. Secuencia de los desplazamientos tridimensionales del balasto en ancho ibérico por una carga cuasi – estática. (Elaboración propia)	110
Ilustración 65. Secuencia de los desplazamientos tridimensionales de las partículas de balasto en ancho estándar por una carga cuasi – estática. (Elaboración propia)	111
Ilustración 66. Comparativa en planta entre anchos del desplazamiento vertical tras la aplicación de una carga cuasi – estática. (Elaboración propia).....	112
Ilustración 67. Comparativa en alzado entre anchos del desplazamiento vertical tras la aplicación de una carga cuasi – estática. (Elaboración propia).....	113
Ilustración 68. Representación del desplazamiento horizontal en planta en función del ancho de vía. (Elaboración propia).....	114
Ilustración 69. Representación del desplazamiento horizontal en alzado de las partículas en función del ancho de vía. (Elaboración propia)	115
Ilustración 70. Representación de la secuencia de velocidades para la capa de balasto en la simulación de ancho ibérico. (Elaboración propia)	116
Ilustración 71. Representación en alzado de la secuencia de velocidades del balasto en la simulación de ancho estándar. (Elaboración propia)	117
Ilustración 72. Representación de un corte longitudinal a la capa de balasto en donde se representan la velocidad de las partículas entre ambos anchos. (Elaboración propia)	118
Ilustración 73. Comparativa de las cadenas de fuerzas normales entre ambos anchos tras la aplicación de una carga cuasi – estática. (Elaboración propia)	119
Ilustración 74. Comparativa en planta de las cadenas de fuerzas entre los dos anchos simulados. (Elaboración propia)	120
Ilustración 75. Gráfica representativa del descenso producido en la traviesa en función del ancho de vía. (Elaboración propia)	121
Ilustración 76. Secuencia de los desplazamientos tridimensionales de las partículas de balasto en el ancho ibérico. (Elaboración propia).....	122
Ilustración 77. Proceso temporal de los desplazamientos de las partículas de balasto en la simulación de ancho estándar. (Elaboración propia)	123
Ilustración 78. Representación en planta de los desplazamientos verticales entre ambos anchos. (Elaboración propia)	124
Ilustración 79. Vista frontal de los desplazamientos verticales de las partículas de balasto entre ambos anchos. (Elaboración propia).....	125

Ilustración 80. Vista en planta de los desplazamientos laterales del balasto en función del ancho de vía. (Elaboración propia)	126
Ilustración 81. Vista frontal de los desplazamientos horizontales del balasto en ambos anchos. (Elaboración propia)	126
Ilustración 82. Secuencia de las velocidades de las partículas de balasto en la vía de ancho ibérico. (Elaboración propia).....	127
Ilustración 83. Secuencia de las velocidades del balasto en la vía de ancho estándar. (Elaboración propia).....	128
Ilustración 84. Comparativa de las velocidades del balasto en una sección longitudinal central en ambos anchos. (Elaboración propia).....	129
Ilustración 85. Representación de las cadenas de fuerzas normales mediante una vista frontal en ambos anchos. (Elaboración propia).....	130
Ilustración 86. Representación de las cadenas de fuerzas normales mediante una vista en planta en ambos anchos. (Elaboración propia)	131
Ilustración 87. Desplazamiento producido en la traviesa tras el paso de un eje simple de la Serie 447. (Elaboración propia).....	133
Ilustración 88. Desplazamiento producido en una traviesa tras el paso de la composición completa de la Serie 447. (Elaboración propia).....	134
Ilustración 89. Desplazamiento tridimensional de las partículas de balasto durante el aumento de carga sobre la traviesa. (Elaboración propia).....	135
Ilustración 90. Desplazamiento tridimensional de las partículas de balasto en el momento de mayor carga en la traviesa. (Elaboración propia).....	136
Ilustración 91. Desplazamiento tridimensional de las partículas de balasto durante el proceso de descarga de la traviesa. (Elaboración propia).....	136
Ilustración 92. Desplazamiento tridimensional de las partículas de balasto tras finalizar la descarga de la traviesa. (Elaboración propia).....	137
Ilustración 93. Desplazamiento vertical de las partículas de balasto en el momento de máxima aplicación de la carga para un eje simple de la Serie 447. (Elaboración propia)....	138
Ilustración 94. Desplazamiento horizontal de las partículas de balasto en el momento de máxima aplicación de la carga para un eje simple de la Serie 447. (Elaboración propia)....	139
Ilustración 95. Desplazamiento tridimensional de las partículas de balasto en el momento del 1º eje del 1º bogie (arriba), 1º eje del 3º bogie (centro), 1º eje del 5º bogie (abajo) sobre la traviesa. (Elaboración propia).....	140

Ilustración 96. Desplazamiento vertical de las partículas de balasto en el momento del 1º eje del 1º bogie (arriba), 1º eje del 3º bogie (centro), 1º eje del 5º bogie (abajo) sobre la traviesa. (Elaboración propia)	141
Ilustración 97. Desplazamiento vertical del balasto en el momento del 1º eje del 1º bogie (arriba), 1º eje del 3º bogie (centro), 1º eje del 5º bogie (abajo) sobre la traviesa. (Elaboración propia)	142
Ilustración 98. Secuencia de las velocidades de las partículas de balasto durante la fase de acercamiento del eje hacia la traviesa. (Elaboración propia)	143
Ilustración 99. Velocidad de las partículas de balasto tras la acción sobre la traviesa de: 1º eje del 1º bogie (arriba), zona central del bogie (centro) y 2º eje del 1º bogie (inferior). (Elaboración propia)	144
Ilustración 100. Vistas en alzado y planta de las cadenas de fuerzas en la capa de balasto en el momento en el que el eje esta sobre la traviesa. (Elaboración propia)	145
Ilustración 101. Secuencia de las cadenas de fuerzas tras el paso del 1º eje del 1º bogie (arriba), 1º eje del 3º bogie (centro), 1º eje del 5º bogie (abajo) sobre la traviesa. (Elaboración propia)	146
Ilustración 102. Representación gráfica del desplazamiento de la traviesa tras el paso de un eje de la Serie 130. (Elaboración propia)	148
Ilustración 103. Desplazamiento de la traviesa tras el paso de la composición de la Serie 130 a una velocidad de 250 km/h. (Elaboración propia)	148
Ilustración 104. Desplazamiento tridimensional del balasto durante el proceso de carga de la traviesa. (Elaboración propia)	149
Ilustración 105. Momento de máxima aplicación de la carga tras el paso del eje sobre la traviesa. (Elaboración propia)	150
Ilustración 106. Proceso de descarga de la traviesa una vez el eje ha sobrepasado la misma. (Elaboración propia)	151
Ilustración 107. Desplazamiento de las partículas de balasto tras la descarga completa de la traviesa. (Elaboración propia)	151
Ilustración 108. Vistas en planta y alzado de los desplazamientos verticales de las partículas de balasto. (Elaboración propia)	152
Ilustración 109. Vistas en planta y alzado de los desplazamientos laterales de las partículas de balasto. (Elaboración propia)	153
Ilustración 110. Representación del desplazamiento tridimensional de las partículas de balasto en el momento en el que el primer eje, el eje central y el último eje se encuentran sobre la traviesa. (Elaboración propia)	154

Ilustración 111. Desplazamiento vertical de las partículas de balasto en el momento en el que el primer eje, el eje central y el último eje se encuentran sobre la traviesa. (Elaboración propia)	155
Ilustración 112. Desplazamiento horizontal de las partículas de balasto en el momento en el que el primer eje, el eje central y el último eje de la composición se encuentran sobre la traviesa. (Elaboración propia)	156
Ilustración 113. Representación de las velocidades de las partículas de balasto en el proceso de carga (arriba), eje sobre traviesa (centro) y descarga (abajo). (Elaboración propia)	157
Ilustración 114. Representación de las velocidades de las partículas tras el paso del primer eje del bogie, la zona central del bogie y el segundo eje del bogie en una composición de la Serie 130. (Elaboración propia).....	158
Ilustración 115. Representación de las velocidades del balasto en el momento en el que el eje central de la composición esta sobre la traviesa. (Elaboración propia)	159
Ilustración 116. Representación de las cadenas de fuerzas normales en el momento de máxima aplicación de la carga. (Elaboración propia)	160
Ilustración 117. Cadenas de fuerzas en el momento en el que el primer eje, el eje central y el último eje de la composición se encuentra sobre la traviesa. (Elaboración propia)	161
Ilustración 118. Comparativa de los descensos de la traviesa para realizar análisis de sensibilidad. (Elaboración propia).....	163

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Síntesis de las ventajas e inconvenientes del balasto dependiendo de su geometría. (Ngamkhanong et al., 2017)	21
Tabla 2. Características de los materiales y del modelo DEM. (Elaboración propia)	40
Tabla 3. Parámetros fundamentales para determinar el comportamiento del balasto en el modelo. (Elaboración propia)	42
Tabla 4. Tipo de sollicitación y resultados obtenidos para cada caso. (Elaboración Propia).....	43
Tabla 5. Principales características del tramo Valencia – Sagunto. (Elaboración propia con los datos obtenidos en la declaración sobre la red 2025 de Adif).....	44
Tabla 6. Curva granulométrica del balasto. (Adif)	47
Tabla 7. Circulaciones en un día laborable en las líneas de cercanías C-5 y C-6. (Elaboración propia a partir de datos de www.renfe.com).....	50
Tabla 8. Características del material motor utilizado en los trayectos de Cercanías. (Elaboración propia a partir de las ilustraciones de www.listadotren.es)	51
Tabla 9. Número de circulaciones en un día laborable en el servicio de Media Distancia en el tramo Valencia – Sagunto. (Elaboración propia a partir de datos de www.renfe.com).....	52
Tabla 10. Características del material motor utilizado en los trayectos de Media Distancia. (Elaboración propia a partir de las ilustraciones de www.listadotren.es y www.renfe.com)	53
Tabla 11. Número de circulaciones un día laboral en el trayecto de Larga Distancia en el tramo Valencia – Sagunto. (Elaboración propia a partir de www.renfe.com)	54
Tabla 12. Características del material motor utilizado en los trayectos de Larga Distancia. (Elaboración propia a partir de las ilustraciones de www.listadotren.es y www.renfe.com)	55
Tabla 13. Características del material habitual en el transporte de cargas por Renfe. (Elaboración a partir de las ilustraciones de www.listadotren.es y datos de www.renfe.es)	56
Tabla 14. Datos granulométricos empleados en el balasto del modelo creado. (Elaboración propia con datos de Adif).....	62
Tabla 15. Características mecánicas de los principales materiales utilizados para la creación del modelo. (Elaboración propia)	65
Tabla 16. Valores de las rigideces obtenidos tras la medición de los descensos de traviesa en la vía en función del material rodante. (Elaboración propia)	78
Tabla 17. Valores de las rigideces de los modelos numérico en función del ancho de vía y el tipo de carga. (Elaboración propia).....	79



Tabla 18. Valor de la carga aplicado simulando el peso sobre cada carril, Q1 corresponde al lado izquierdo de la traviesa (carril común) y Q2 corresponde al lado derecho de la traviesa (carril correspondiente en cada modelo). (Elaboración propia).....94

Tabla 19. Casos de carga analizados en la sollicitación cuasi – estática. (Elaboración propia) . 108

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la época actual, el ferrocarril desempeña un papel esencial en el sistema de las redes de transporte de mercancías y de pasajeros en la mayoría de los países del mundo. Además, el transporte ferroviario está considerado como un modo de transporte el cual puede ubicarse dentro de la movilidad sostenible, por lo cual, en los últimos años se están desarrollando unas series de políticas y actuaciones para promover en la medida de lo posible el uso de dicho transporte. Así sucede en España, donde el Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible está intentando elevar la cuota del transporte ferroviario tanto de pasajeros como de las mercancías transportadas impulsando iniciativas como el Mercancías 30 cuyo objetivo es incrementar la cuota de transporte ferroviario de mercancías a un 10% para el 2030.

El aumento de la demanda de pasajeros y mercancías se ve incrementado debido a las cargas por eje que debe soportar la infraestructura y al aumento de las velocidades de circulación. Todo esto exige una mayor resistencia de los componentes que conforman la infraestructura ya que el número de solicitaciones al que se ven expuestos es cada vez mayor. En la actualidad, la mayor parte de las vías de ferrocarril en el mundo están compuestas por una capa de balasto, a excepción de las vías en placa, la cual tiene las siguientes características según lo definido por Adif:

- Amortiguar y distribuir las cargas transmitidas por el paso de los trenes, asegurando en todo momento la estabilidad de traviesa-carril.
- Proteger a la explanación de los efectos de las posibles heladas.
- Debe permitir las operaciones de nivelación y alineación de la vía, así como cualquier operación de mantenimiento.
- Drenar las aguas de lluvia de forma eficaz para evitar daños en la capa.

El desgaste de la capa de balasto debido a la circulación del material rodante puede ocasionar asientos y desalineación de la vía, lo cual puede repercutir en un peligro para la seguridad de los trenes y pasajeros. Por todo lo citado anteriormente resulta indispensable una correcta planificación de las operaciones de mantenimiento de la capa de balasto. Dada esta situación, nace la necesidad de profundizar en la comprensión del comportamiento de la capa de balasto antes las distintas cargas verticales y horizontales a las que se encuentra sometida la vía.

El balasto se identifica por ser un material discontinuo y heterogéneo el cual es necesario que sea estudiado mediante Método de Elementos Discretos, conocido por sus siglas en inglés como DEM. Dicho método es muy efectivo para el análisis de problemas que impliquen materiales granulares, como resulta ser el balasto.

1.2 Alcance

En el transcurso del siguiente documento se realizará un modelo el cual simule el comportamiento de la capa de balasto utilizando el Método de Elementos Discretos. Dicho modelo se calibrará, se añadirán los parámetros necesarios y se validará para observar el comportamiento de dicha capa para vías de ancho mixto, es decir, vías en donde el ancho estándar y el ancho ibérico conviven sobre una única traviesa. Una vez calibrado el modelo se procederá a realizar distintos casos de carga teniendo en cuenta el tipo de material rodante que circula en el tramo ferroviario Valencia-Sagunto y se realizará la comparación entre ancho estándar y ancho ibérico. Una vez hecha esta comparación se observarán las distintas variaciones que puedan ocasionar los distintos anchos. Realizar estudios acerca de las vías de ancho mixto es fundamental debido a la gran cantidad de ventajas que este tipo de vía tiene frente a otras de un único ancho.

Lo primero y más importante es que tener vías de ancho mixto permite disponer de una gran interoperabilidad con países vecinos ya que con la ayuda de un intercambiador de anchos un mismo tren puede circular en vía de ancho ibérico en España y en vía de ancho estándar en Francia. Otra de las ventajas de tener vías de ancho mixto es que la inversión en construcción de infraestructura es menor ya que una vía de ancho mixto tiene menos traviesas y menos carriles que si se tienen dos vías distintas para cada ancho.

También decir que no todo son ventajas, la vía de ancho mixto resulta hasta en un 40% más cara de mantener ya que mucha de la maquinaria que se necesita no existe y es necesario recurrir a máquinas de bateo, perfilado y estabilización de desvíos, las cuales aumentan los costes del mantenimiento.

Por tanto, el presente trabajo tiene una importancia elevada dado que comprender el comportamiento en las vías de ancho mixto puede repercutir en reducir los costes de mantenimiento e incrementar el número de pasajeros y mercancías al poder asegurar un correcto comportamiento de la capa de balasto y por tanto del conjunto de la vía.

1.3 Propósitos

El propósito de este trabajo es la creación de un modelo que simula el comportamiento de la capa de balasto ferroviaria permitiendo estimar el comportamiento ante las cargas que produce el material rodante. Dicho modelo se particularizará al tramo de vía ferroviaria entre Valencia y Sagunto.

La realización del objetivo principal está vinculado a alcanzar los siguientes objetivos parciales:

- Desarrollar un modelo que permita estudiar como interactúa la capa de balasto con la traviesa.
- Verificar el correcto funcionamiento del modelo para la representación del balasto.
- Focalizar el modelo al tramo ferroviario Valencia-Sagunto.
- Obtener una serie de conclusiones que ayuden a la comprensión y análisis del comportamiento de dicha capa.

Con todo lo anterior se espera que las conclusiones del presente trabajo sean de utilidad para el desarrollo y avance de otros modelos de simulación del comportamiento de balasto más complejos que muestren con exactitud las condiciones a las que se ve afectada la vía ferroviaria.

2 ESTADO DE LA TÉCNICA

2.1 Modelización computacional del balasto

2.1.1 Método de Elementos Finitos

Los modelos de elementos finitos se han utilizado durante mucho tiempo para llevar a cabo simulaciones a gran escala del comportamiento general de la vía ferroviaria, abarcando todos sus componentes y facilitando realizar representaciones a largo plazo.

Por consiguiente, en el caso concreto de la capa de balasto, el uso de métodos continuos permite obtener las relaciones entre la tensión y la deformación, pero no proporciona datos detallados sobre las partículas del balasto, ni sobre su fractura o sus discontinuidades locales. Además, la mayoría de los métodos convencionales que se basan en el análisis continuo no logran simular adecuadamente los hundimientos de la vía. Por lo tanto, dado que el balasto es un material discontinuo por naturaleza, se requieren técnicas de modelado alternativas para su análisis. (Ngamkhanong et al., 2017).

2.1.2 Método de Elementos Discretos

El Método de Elementos Discretos, es una alternativa al Método de Elementos Finitos para representar el comportamiento de materiales granulares, como es en su caso el balasto. Este enfoque es beneficioso para examinar el comportamiento microscópico y macroscópico de materiales discontinuos. En el Método de Elementos Discretos, se determina individualmente el desplazamiento, la velocidad, la aceleración y las fuerzas que afectan a cada partícula, para luego verificar si todos los datos están dentro de un rango adecuado. La principal dificultad de este método radica en el extenso tiempo de cálculo requerido, el cual surge de la necesidad de calcular cada partícula del modelo de manera individual. (Alabbasi & Hussein, 2021).

A finales de los años 70 se incorpora el Método de Elementos Discretos en (Cundall & Strack, 1979) para analizar cómo se comportan los empaquetamientos de material granular en dos dimensiones. A principios de los 90 se establecieron los fundamentos del método en (Cundall & Hart, 1992), enfocándose en mejorar la representación de los contactos, de los materiales y en el algoritmo para detectar los contactos. Desde ese momento, el Método de Elementos Discretos ha sido cada vez más utilizado hasta llegar a la actualidad. Con el transcurso del tiempo, se han desarrollado más y mejores técnicas para simular materiales como es en este caso, el balasto ferroviario.

A lo largo del tiempo se han ido realizando cada vez más estudios acerca del comportamiento de la capa de balasto, pero hasta comienzos del siglo XXI no son tantos los estudios que se pueden encontrar acerca de este material. Esto se debe principalmente a que para realizar un análisis del comportamiento de la capa de balasto es necesario recurrir a métodos computacionales los cuales se han expandido enormemente en los últimos años debido al aumento de la capacidad de procesamiento de los ordenadores (Véase Ilustración 1).

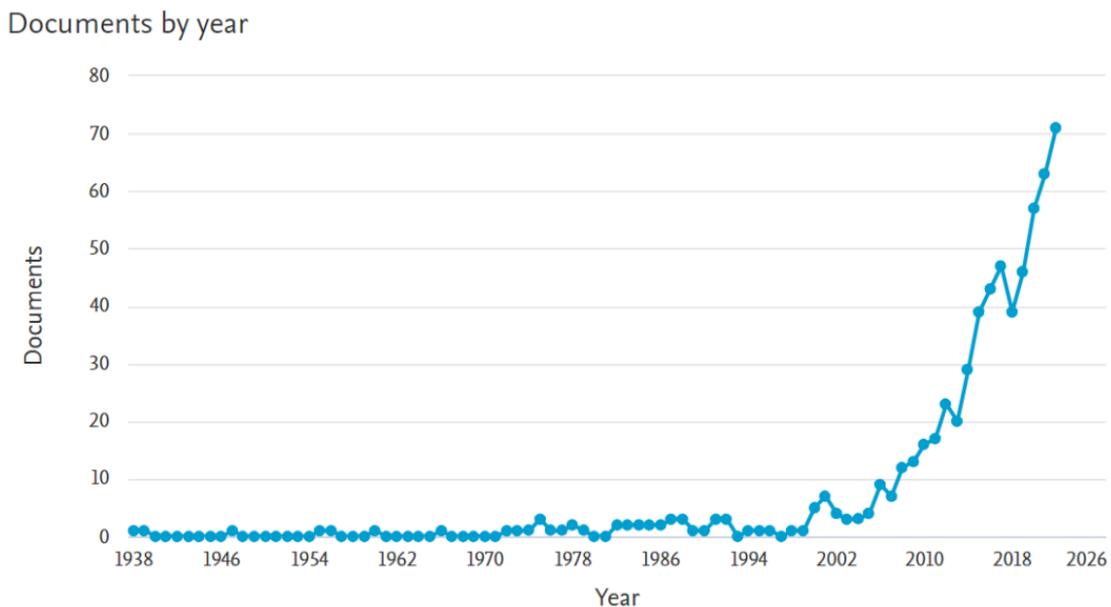


Ilustración 1. Representación gráfica del número de artículos publicados cada año sobre la modelización del balasto utilizando el Método de Elementos Discretos. (Base de datos Scopus)

2.2 Estructura de la partícula de balasto

La modelización de la estructura geométrica del balasto en simulaciones de elementos discretos es un gran desafío y un tema muy estudiado a lo largo de los años. La importancia otorgada a la forma de las piedras de balasto se debe a su gran influencia que esta puede tener en la reacción dinámica del conjunto, ya que las aristas afiladas y formas no curvas ayudan a que las partículas traben fácilmente. (Suhr & Six, 2020).

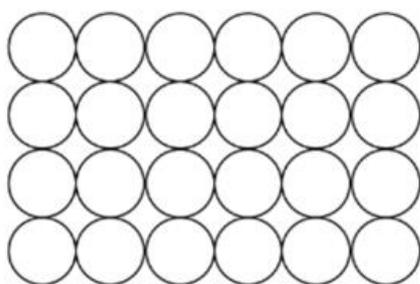
La manera en la que están dispuestas las partículas en la simulación tiene un impacto importante en el comportamiento mecánico general del sistema. En las simulaciones del Método de Elementos Discretos, identificar los puntos de contacto entre las partículas en un empaquetamiento es esencial para el cálculo. Por eso, las figuras simples como las esferas necesitan menos tiempo de cálculo ya que la detección de contactos entre ellas es más fácil que en formas complejas como los poliedros (Véase Tabla 1).

	Circular	Circular cluster	Spherical	Spherical cluster	Polygonal and Polyhedral
Dimensional	2D	2D	3D	3D	2D, 3D
Shape	Regular (Simplified shape), Unrealistic	Irregular (better for overlapping circular cluster), Realistic	Regular, Unrealistic	Irregular (better for overlapping spherical cluster), Realistic	Irregular (match real particle shape), Realistic
Contact interlocking	Weak	Strong	Weak	Strong	Strong
Computational time	Medium	high	high	high	highest
Limitation	2D, Ballast behaviour is unrealistic	Many circulars of various size are required	Particle behaviour is unrealistic	Many spherical of various size are required	Contact detections are difficult to define

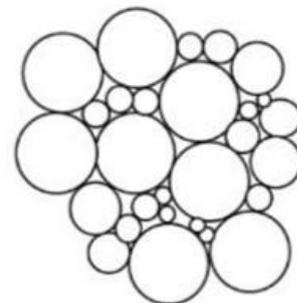
Tabla 1. Síntesis de las ventajas e inconvenientes del balasto dependiendo de su geometría. (Ngamkhanong et al., 2017)

2.2.1 Circular y cúmulos circulares

En el pasado, la forma circular en 2 dimensiones fue la primera forma introducida para el modelado de partículas de balasto, para la cual no se requerían largos tiempos de computación ni potentes ordenadores. Se debe tener en cuenta que al simular el balasto como un círculo existen diversas limitaciones. En primer lugar, la deformación obtenida era poco realista debido a una débil interconexión entre cada partícula, por lo que se pensó que se podría mejorar dicha deformación si se introducían formas circulares de menor tamaño entre las esferas de mayor diámetro. Por lo tanto, se optó por considerar el conjunto de partículas (circular cluster por su nombre en inglés) para mejorar la unión y la forma del balasto, aunque esto incrementase los tiempos de computación. (Lobo-Guerrero and Vallejo 2006, Thakur et al. 2010).



(a) Circular



(b) Circular cluster

Ilustración 2. Representación del balasto circular a la izquierda y del conjunto circular de balasto a la derecha. (Ngamkhanong et al., 2017)

2.2.2 Esferas

Las esferas son utilizadas en los Modelos de Elementos Discretos tridimensionales para imitar diversas partículas gracias a su sencillez. Esta es la forma más básica de representar el balasto en un modelo tridimensional y la más rápida de procesar computacionalmente gracias a su capacidad para detectar fácilmente los contactos entre partículas.

Este tipo de formas representan las piedras de balasto de manera inexacta, ya que el balasto no es redondo, sino que tiene bordes afilados, caras planas y áreas no curvas. Por tanto, aunque las esferas han tenido gran aceptación en los modelos de Elementos Discretos, su uso en el balasto ha sido restringido por estas razones.

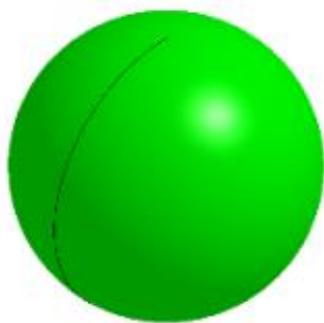
La mayoría de los estudios en la literatura sobre el modelado del balasto utilizando esferas, se centran en comparar un modelo de esferas con otro modelo que empleaba una construcción geométrica más realista. En todos estos estudios, las esferas no lograban resultados tan buenos como los cúmulos de esferas en las distintas pruebas a las cuales se le sometía, debido a que las esferas no podían unir las partículas entre sí. (Coetzee, 2016; Lim & McDowell, 2005; Lu & McDowell, 2006). Pese a estas limitaciones, no se debe subestimar la utilización de esferas por su capacidad de llevar a cabo simulaciones a gran escala ya que al tener formas esféricas se reducen drásticamente los tiempos de computación al detectar de manera más rápida los contactos entre partículas.

Para que un modelo que utiliza esferas pueda reflejar correctamente la realidad, es imprescindible añadir lo que en el ámbito de simulación de partículas se conoce como "Resistencia a la rodadura", el cual se trata en (Aboul Hosn et al., 2017; Jiang et al., 2005; Kozicki & Teichman, 2011). Este momento de origen artificial se utiliza en partículas esféricas para disminuir la rotación en la dirección del movimiento. Así, al tener un tiempo de cálculo reducido, es posible estimar cómo se comportaría una partícula irregular al rodar.

2.2.3 Cúmulos de esferas

En vista de la necesidad de representar formas complejas de partículas en simulaciones de elementos discretos, pero sin exceder los tiempos de cálculo aceptables, aparecen los cúmulos de esferas. Como su nombre indica, son esferas que están conectadas, ya sean superpuestas o no, y que trabajan de forma combinada. Dentro de un conjunto de esferas, la posición relativa entre ellas no varía, por lo tanto, el conjunto se comporta como una sola partícula rígida. La identificación de interacciones entre partículas se lleva a cabo de manera independiente para cada esfera en el grupo, excluyendo aquellas que ocurren dentro de la misma agrupación, garantizando la sencillez y rapidez del proceso de cálculo.

El análisis de las fuerzas y el momento de inercia se realizan tomando como referencia el centro de gravedad del conjunto. Es necesario ajustar la masa y la inercia cuando hay superposición entre los componentes del cúmulo como se demuestra en (Ferrellec & McDowell, 2010; García et al., 2009). Además, los conjuntos de esferas permiten recrear las irregularidades de las partículas de balasto y también proporcionan una gran capacidad de trabazón entre las partículas. No obstante, carecen de aristas afiladas y las partículas de balasto generadas de esta forma tienen formas redondeadas que no se ven en las piedras reales de balasto. A medida que se intenta acercar la forma de las partículas a la realidad, se requerirá un mayor número de partículas, lo que resultará en un aumento del tiempo de cálculo y en la reducción del tamaño de las simulaciones que se pueden realizar.



(a) Spherical



(b) Spherical cluster

*Ilustración 3. Representación de una esfera independiente (izquierda) y de un cúmulo de esferas (a la derecha).
(Ngamkhanong et al., 2017.)*

Una de las ideas barajadas para reducir los tiempos de computación fue la creación de cúmulos simples con solo tres esferas que permitieran lograr las porosidades observadas en las pruebas de campo y laboratorio, y poder usarlos en simulaciones de elementos discretos de manera eficaz. Según los autores (Suhr & Six, 2020) tres esferas son el mínimo de partículas necesarias para evitar las rotaciones libres en los tres ejes. El punto fundamental de este estudio es no intentar obtener una representación visual de la forma de las piedras de balasto, lo cual usualmente implica el uso de muchas esferas y afecta negativamente el tiempo de cálculo. Para ello los autores escogieron los principales descriptores de forma de las partículas: la elongación, e , índice de lajas, f , esfericidad, ψ , y el índice de convexidad, c , y se crearon diversas colecciones de cúmulos (Véase Ilustración 4).

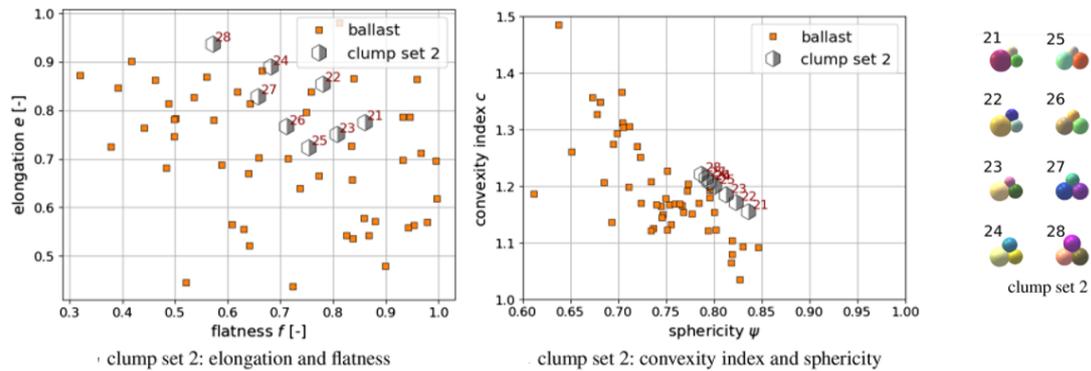


Ilustración 4. Muestra del segundo set de cúmulos y su correlación con los descriptores de forma. (Suhr & Six, 2020)

Otro de los estudios sigue un camino totalmente distinto a la hora de la creación de las partículas de balasto (Balamonica et al., 2023; Zhang et al., 2017). En estos estudios, se busca acercar lo más posible la forma de los grupos de esferas a la forma verdadera de las piedras de balasto, aunque los tiempos de computación sean más elevados. El proceso más frecuente implica escanear en 3D una o varias muestras reales de piedras de balasto mediante ordenadores para generar una nube de puntos tridimensional, seguida de la creación de una superficie cerrada que puede llenarse con esferas.

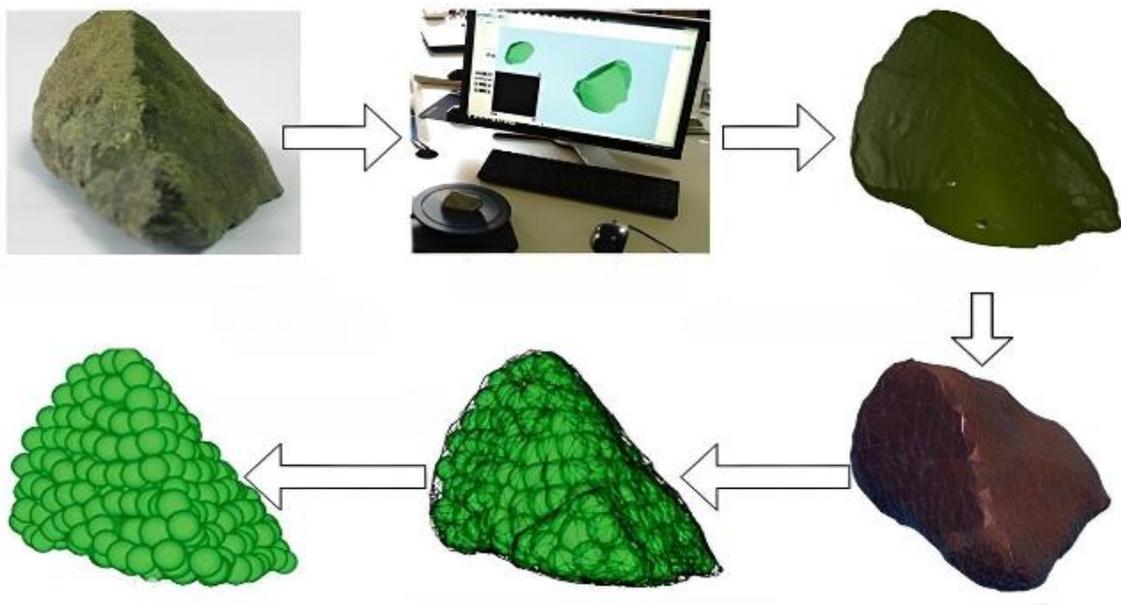


Ilustración 5. Fases del proceso para la recreación de los cúmulos de esferas para simular la piedra de balasto. (Adaptación de Zhang et al., 2017)

Algunos estudios comparan los resultados de usar cúmulos de dos esferas simples con modelos complejos basados en el escaneo 3D de piedras reales de balasto. El estudio de (Laryea et al., 2014) demuestra que se lograron resultados de asiento de la traviesa similares con ambos modelos, pero con diferentes tiempos de computación, siendo el de escaneo 3D más lento.

2.2.4 Poliedros

Los poliedros son la alternativa para representar el balasto en lugar de utilizar partículas esféricas independientes o agrupadas. Son apropiados para caracterizar las piedras de balasto gracias a sus caras planas y aristas, generando bordes angulosos que permiten la unión de las partículas. No obstante, es necesario que los poliedros se restrinjan a mostrar geometrías convexas para evitar que una partícula pueda tocar a otra en dos puntos al mismo tiempo. La principal desventaja de los poliedros es la complejidad para identificar las interacciones entre partículas, lo que provoca un incremento significativo en el tiempo de cálculo y restringe su aplicación en modelos de gran escala.

En algunos trabajos, como en (Eliáš, 2013), se utilizan poliedros para representar las piedras de balasto, creando una muestra a partir de poliedros generados por teselación con los diagramas de Voronoi. Se obtiene el volumen, el centroide y la inercia de cada partícula al dividir el poliedro en tetraedros y calcular la contribución de cada uno.

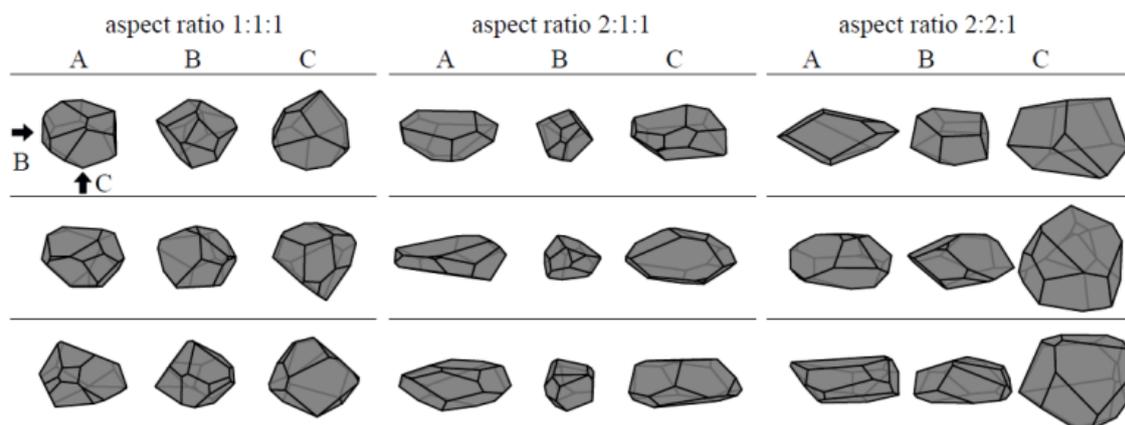


Ilustración 6. Ejemplos de piedras de balasto creadas por teselación de Voronoi. Por cada cuerpo se muestra su vista frontal (A), lateral (B) e inferior (C). (Eliáš, 2013).

Posteriormente, se realiza un ensayo edométrico en un cilindro de acero de 300 mm de diámetro y 150 mm de alto, usando partículas de balasto de tamaño entre 37,5 y 50 mm. El análisis de datos concuerda con los resultados de las pruebas a excepción del comienzo, ya que no se incluyó la simulación de la vibración del balasto. Dicha prueba consiste en tres fases: la primera fase en la cual se colocan las piedras de manera aleatoria y se aplica una carga, la segunda fase en la cual se ha llegado a la carga máxima a la cual se iba a realizar el ensayo, por tanto, las piedras de balasto ya se han reorganizado y compactado y la última fase la cual consiste en eliminar la carga y ver el desplazamiento de las partículas de balasto. (Véase Ilustración 7).

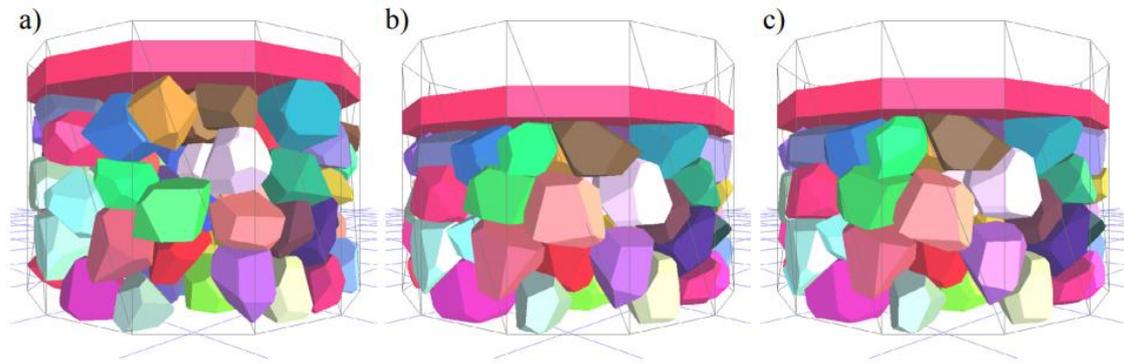


Ilustración 7. Proceso del ensayo edométrico realizado sobre el balasto con YADE. De izquierda a derecha se representan las tres fases del ensayo. (Eliás, 2013)

2.2.5 Elementos potenciales

Los elementos potenciales son partículas que tienen la apariencia de un poliedro redondeado curvo, lo que ofrece una opción para simular partículas no esféricas en elementos discretos. El propósito de estas partículas es facilitar la generación de figuras complejas, siempre y cuando sean convexas para evitar contactos múltiples, considerando así los efectos de la forma de las partículas en el comportamiento de los medios granulares, como ocurre con el balasto. La mayor simplicidad en la detección de los contactos entre las distintas partículas es la principal ventaja de esta clase de partículas sobre los poliedros, lo que resulta en una reducción en el tiempo de cálculo. Dicho concepto de elementos potenciales fue desarrollado en la geometría bidimensional por (Houlsby, 2009) y por (Boon et al., 2013) para el caso tridimensional.

Los elementos potenciales se describen mediante una función en un sistema de coordenadas locales que definen la superficie que rodea a la partícula. Además, es necesario disponer de la función, así como de sus derivadas primera y segunda, para cada punto del espacio. En (Ahmed et al., 2016) se introduce una técnica para simular pruebas triaxiales en muestras de balasto y luego la validan utilizando datos de prueba reales (Véase Ilustración 8). Se utilizaron partículas potenciales generadas con un programa diseñado a propósito para simular la forma de las partículas de balasto, lo cual permitió crear una librería de partículas similares a las piedras de balasto reales.

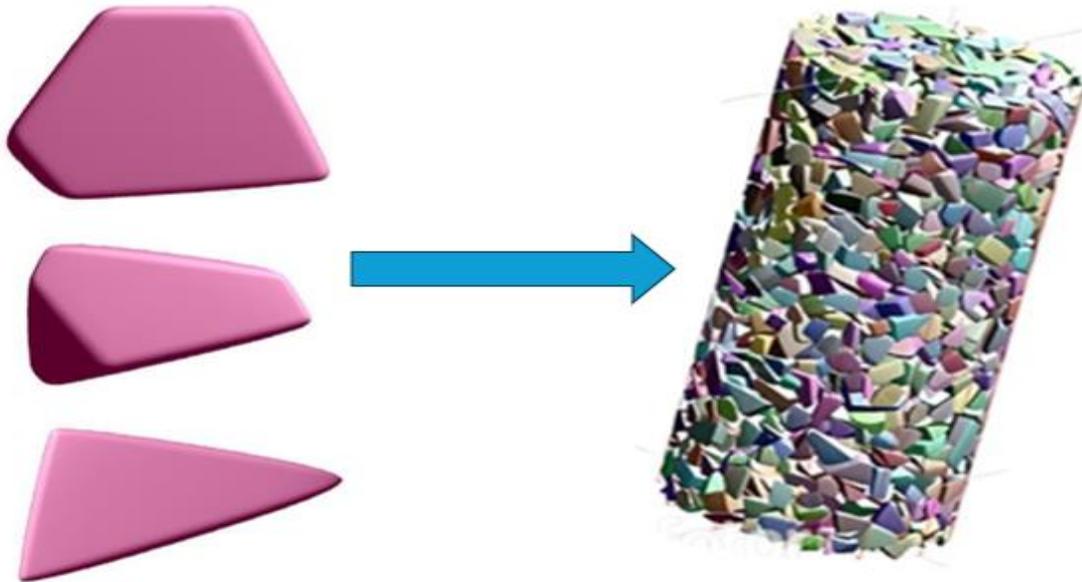


Ilustración 8. Muestra a la izquierda de ejemplos de elementos potenciales de balasto y a la derecha la colocación aleatoria de estos para realizar el ensayo triaxial. (Adaptación de Ahmed et al., 2016)

2.3 Modelos de contacto

En este apartado se describen los modelos de contacto más utilizados en el Método de Elementos Discretos para simular cómo se comporta el balasto. El modelo de contacto es esencial dentro del Método de Elementos Discretos, ya que su objetivo es definir la interacción entre dos elementos que se encuentran en contacto. Una parte considerable del tiempo de cálculo en las simulaciones se destina a identificar y medir los contactos entre partículas, por lo tanto, la elección del modelo de contacto influye significativamente en el rendimiento de la simulación (Ngamkhanong et al., 2017).

Hay dos principales enfoques en los modelos de contacto para partículas granulares: el enfoque de "partículas duras" y el enfoque de "partículas blandas". En el primer escenario, las colisiones entre partículas se representan como sucesos instantáneos, por lo tanto, no se considera la deformación de las partículas ni las acciones a largo plazo, lo que significa que no se ha utilizado para simular el balasto a pesar de su mayor eficiencia computacional. En relación con el balasto, la mayoría de los ensayos realizados son a partir de modelos de contacto basados en la teoría de "partículas blandas" las cuales posibilitan la incorporación de fuerzas entre partículas de larga duración sacrificando la eficiencia computacional. En este tipo de modelos se considera la deformación de las partículas permitiendo un solape entre las partículas en contacto, de modo que los contactos ocurren en un plano donde actúan fuerzas normales y tangenciales en lugar de ser puntuales (Di Renzo & Di Maio, 2004).

En la realidad, el modelo de contacto varía según la forma de las partículas utilizadas, por lo que se ha creado un modelo de contacto específico para cada tipo de partícula. Dado que las esferas son versátiles, sencillas y ampliamente aceptadas en el Método de Elementos Discretos, la mayoría de los modelos de contacto desarrollados se aplican a partículas esféricas o circulares, mientras que los diseñados para partículas no esféricas más complejas quedan en el segundo plano.

2.3.1 Modelos para partículas circulares y esféricas

La mayoría de los modelos de partículas circulares o esféricas están desarrollados mediante sistemas de resortes y amortiguadores (Zhu et al., 2007). Hay numerosos modelos para detectar el contacto entre las partículas siendo los más utilizados en la práctica de la simulación de piedras de balasto el modelo elástico lineal de Cundall (Cundall & Strack, 1979) y el modelo no lineal elástico de Hertz - Mindlin, derivado de (Hertz, 1882; Mindlin & Deresiewicz, 1953).

El modelo de elasticidad lineal que fue propuesto originalmente en 1979 por Cundall y Strack para simulaciones en dos dimensiones, es el modelo elástico más básico utilizado en las simulaciones de Elementos Discretos. La teoría se fundamenta en la elasticidad de Hooke, estableciendo rigideces para los contactos normales y tangenciales que vinculan la deformación de la partícula con la fuerza a la que está expuesta a través de combinaciones en serie o paralelo de resortes y amortiguadores.

Existen enfoques basados en la teoría clásica de Hertz (Hertz, 1882) y en la propuesta de (Mindlin & Deresiewicz, 1953) para modelar contactos elásticos no lineales de esferas en las direcciones normal y tangencial. Dado que la resolución combinada para los contactos normales y tangenciales, llamada Hertz - Mindlin, es demasiado complicada y costosa de integrar en los programas de computación de Elementos Discretos, se han ideado algunas simplificaciones al respecto. La simplificación más utilizada en la simulación de partículas de balasto es la propuesta por (Tsuji et al., 1992). Esta simplificación se basa en el supuesto de que no hay deslizamiento entre partículas en contactos tangenciales.

La evaluación de los modelos de contacto más populares se lleva a cabo en (Di Renzo & Di Maio, 2004). En este estudio se contrastan tres modelos mecánicos para simular colisiones elásticas entre partículas: el modelo lineal de Cundall, el modelo no lineal simplificado de Hertz-Mindlin y un modelo no lineal con histéresis basado en Hertz - Mindlin. Las soluciones fueron comparadas tanto a nivel microscópico con los resultados analíticos como a nivel macroscópico con los datos experimentales. Los resultados indicaron que el modelo lineal se ajustaba muy bien a la realidad, a diferencia de los modelos no lineales que apenas mostraron mejoras notables en

el comportamiento de las partículas. No obstante, los escritores indican que esta similitud solamente se conserva si se examinan con precisión los parámetros del modelo elástico. Se sugiere utilizar modelos no lineales para estudiar el movimiento de las partículas en formas esféricas y realizar un análisis detallado. Los autores realizaron una comparación que los llevó a sugerir cambios en el modelo Hertz - Mindlin simplificado en (Di Renzo & Di Maio, 2005). Los autores proponen cambiar el modelo de contacto tangencial para obtener resultados más precisos que el modelo convencional.

2.3.2 Modelos para formas poliédricas

Identificar la interacción entre partículas no esféricas, como poliedros, es más complicada y requiere más tiempo de computación que en el caso de las esferas, lo que representa un reto considerable para estos modelos.

En su estudio (Cundall, 1988), Cundall sugiere el uso del método del plano común para identificar los contactos entre poliedros. La idea del método implica separar el espacio entre dos partículas con un plano bisector, de modo que dos partículas se tocarán si ambas cortan el mismo plano. En caso de que las partículas no estén en contacto, ninguna de ellas cruzará el plano de intersección (Véase Ilustración 9). Otros autores han perfeccionado este enfoque, logrando una rápida identificación del plano bisector (Nezami et al., 2004, 2006), lo que resulta en una notable reducción del número de iteraciones requeridas para encontrar el plano compartido, mejorando así el tiempo de cálculo.

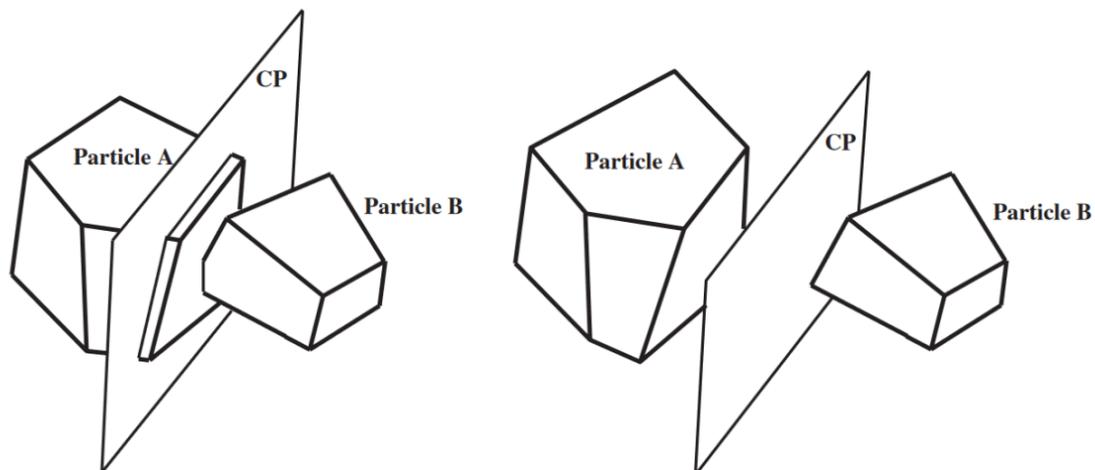


Ilustración 9. Muestra del plano común (CP) entre dos piedras de balasto. A la izquierda piedras en contacto y a la derecha piedras que no intersecan en el plano estando por lo tanto sin contacto entre ellas. (Nezami et al., 2006)

Otra opción relacionada con el concepto de partículas potenciales se sugiere en (Boon et al., 2012), abordando la detección de interacciones entre poliedros como un dilema de optimización. El procedimiento se compone de dos etapas: la primera para identificar las interacciones y la segunda para determinar el lugar de contacto. Durante la etapa inicial se solucionan varias desigualdades lineales para identificar una región de contacto entre las partículas y en caso de que haya una intersección, el punto de contacto se establece como el centro analítico de las desigualdades. Después de identificar el punto de contacto, la normal se puede encontrar utilizando la definición de una partícula potencial dentro del poliedro.

2.4 Fractura del balasto

La circulación del material rodante por las vías ferroviarias expone a la capa de balasto a una serie de cargas cíclicas y vibraciones de distintas frecuencias. Como consecuencia de estas cargas, se produce la fractura y fragmentación de las piedras de balasto además del derrame lateral. La principal razón de la contaminación del balasto es su rotura, lo cual puede ocasionar aumentos en los asentamientos de la vía, provocando posibles desestabilizaciones del emparrillado a lo largo de la vida útil de la infraestructura y poniendo en riesgo la seguridad y estabilidad de los trenes.

Por todo lo anterior, se han realizado investigaciones que utilizan el Método de Elementos Discretos para estudiar la rotura de las piedras de balasto, encontrando en las distintas simulaciones que la fractura del balasto es crucial en la resistencia de la capa de balasto ante cargas cíclicas (Indraratna et al., 2010; Lobo-Guerrero & Vallejo, 2006).

Aunque se reconoce la importancia de incluir la rotura del balasto, su integración en los modelos de Elementos Discretos presenta desafíos. Agregar algoritmos para identificar la rotura de enlaces entre partículas en una simulación aumenta el principal desafío del Método de Elementos Discretos, que es el tiempo de cálculo de las simulaciones. Por lo tanto, en los estudios de (Lim & McDowell, 2005; Lu & McDowell, 2006) se elige llevar a cabo pruebas de compresión cíclica del balasto en la caja sin tener en cuenta la fractura de las piedras.

Hay dos enfoques principales para abordar la fractura de las piedras de balasto: separar las partículas que componen un conjunto y dividir una partícula en otras más pequeñas.

2.4.1 Fractura del enlace de un cumulo de partículas

Este método se fundamenta en la creación de un modelo de conexiones entre las partículas que constituyen un grupo de esferas, por lo tanto, no es utilizable con otras clases de partículas. Se fundamenta en identificar una tensión específica entre las conexiones de las

partículas de un mismo grupo, de manera que, si la tensión en la conexión entre dos partículas supera el límite predeterminado, estas se separan y una se convierte en independiente del cúmulo preestablecido.

En (Indraratna et al., 2010) se propone un modelo en dos dimensiones para las partículas de balasto utilizando agrupaciones de círculos con características comparables a las esferas, pero adaptadas al contexto simplificado de las dos dimensiones. Los montones formados son luego sometidos a ciclos de carga biaxial a una frecuencia específica para estudiar su respuesta. Los datos señalan que la mayor parte de la fractura de enlaces entre partículas ocurre en los primeros ciclos de carga, generando un notable asentamiento inicial que se mantiene. Cuando cesan las roturas nuevas, el desgaste del asiento es mínimo, lo cual confirma que la rotura de las piedras de balasto es crucial en la generación de deformaciones permanentes. Este método también se ha utilizado en investigaciones tridimensionales, como en el estudio (Zhang et al., 2017) donde se crea un modelo tridimensional para analizar cómo el balasto se comporta frente a cargas dinámicas, incluyendo la simulación de su rotura y contaminación. Los datos evidencian la forma en que la fractura de las partículas causa impactos significativos en la estructura, con la mayoría de las fracturas ocurriendo debajo de la traviesa.

2.4.2 Fragmentación de una partícula en otras más pequeñas

Este segundo caso se puede aplicar a todas las partículas, aunque algunos expertos lo consideran menos realista (Zhang et al., 2017). Se trata de establecer un límite de esfuerzo que la partícula puede resistir. Si el esfuerzo supera el límite, la partícula se rompe por completo en diversos fragmentos. Este procedimiento se representa reemplazando la partícula inicial con otras de dimensiones más pequeñas (Véase Ilustración 10).

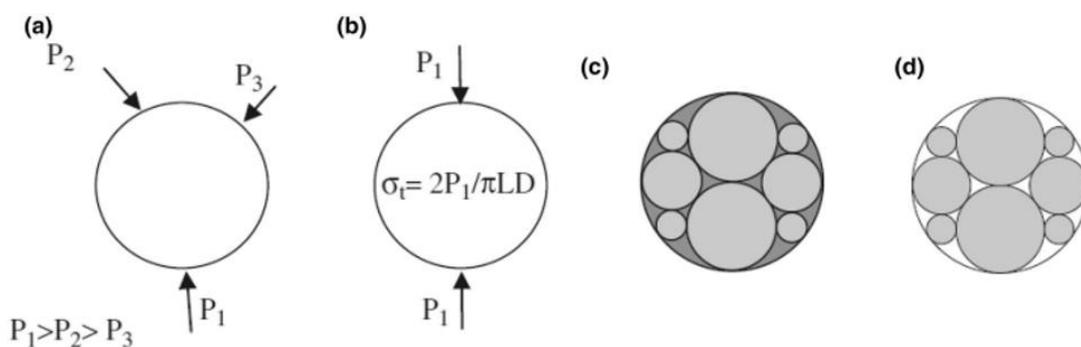


Ilustración 10. Etapas para simular el proceso de fractura de una partícula esférica en otras más pequeñas. (Lobo-Guerrero & Vallejo, 2006).

En (Eliáš, 2014) el autor busca el enfoque hacia los poliedros. Inicialmente, se intentó dividir los poliedros por la mitad (Véase Ilustración 11a), pero las mitades resultantes tenían una resistencia casi igual a la partícula original y se fracturaban en secuencia, por lo que el autor descartó esta propuesta. Finalmente optó por cortar cada poliedro a través de su centroide usando dos planos perpendiculares paralelos al segundo esfuerzo principal, σ_{III} , que se encuentran a un ángulo de $\pi/4$ con los otros esfuerzos principales, como se indica en la Ilustración 11b.

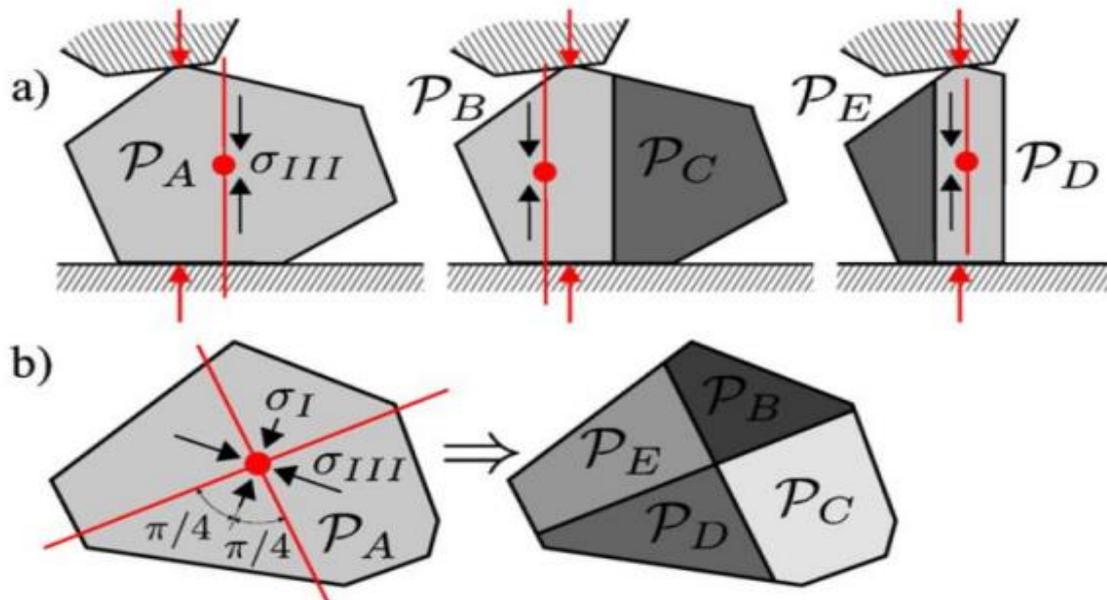


Ilustración 11. Muestra de la división de la piedra en dos mitades, opción que fue descartada (a) y división de la partícula en cuatro mitades menores, opción adoptada finalmente (b). (Eliáš, 2014)

2.5 Cargas dinámicas sobre la capa de balasto

Se ha hablado anteriormente sobre la relevancia de las cargas cíclicas y las vibraciones que afectan al balasto ferroviario. Muchos estudios utilizan cargas estáticas o casi estáticas, pero algunos en la literatura proponen el uso de modelos dinámicos para simular el efecto de los trenes en el balasto.

En el estudio realizado por (Balamonica et al., 2023) se llevan a cabo investigaciones con el fin de calcular la rigidez dinámica del balasto que emplea la empresa Ferrocarriles Federales Suizos (SBB). Los investigadores enfocan su estudio en la reacción del balasto frente a los golpes causados por una maza de 6 kg sobre una losa de hormigón de 0.5 m x 0.5 m x 0.06 m colocada sobre el balasto. El modelo creado logró alcanzar valores de aceleraciones similares en términos de magnitud y duración a los obtenidos en pruebas de laboratorio.

En el estudio de (Indraratna et al.,2010), se simulan varios experimentos triaxiales a gran escala en dos dimensiones de forma periódica, utilizando frecuencias que oscilan entre 10 y 40 Hz. Esta es una manera simple en la que los escritores lograron recrear el movimiento de trenes entre velocidades de 73 km/h y 291 km/h en las líneas de ferrocarril estándar de Australia. Se creó un procedimiento para someter a una prueba controlada de esfuerzo biaxial a la frecuencia deseada con la cantidad adecuada de carga. (Véase Ilustración 12).

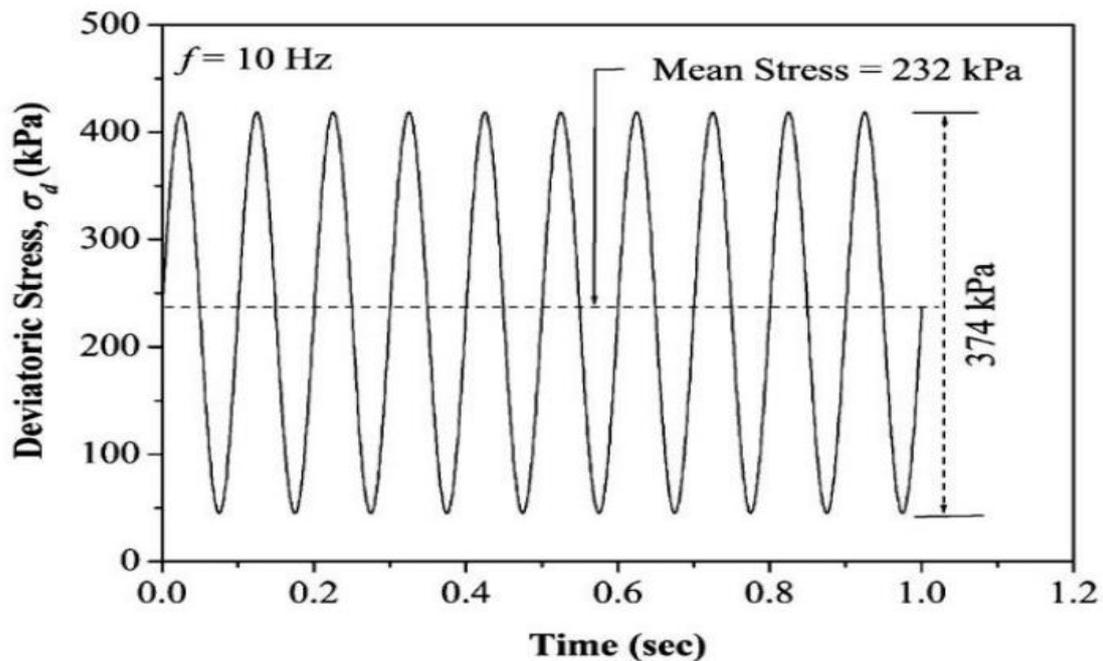


Ilustración 12. Gráfica donde se representa el esfuerzo desviador de 374 kPa con una frecuencia de 10 Hz. (Indraratna et al., 2010)

Otro enfoque más detallado de este asunto se describe en (Zhang et al., 2017) donde se presenta un modelo tridimensional para intentar simular la dinámica de la capa de balasto bajo la acción de unas cargas dinámicas. La investigación se centra en las rutas chinas de transporte de carga pesada, utilizando un vagón de carga típico de China con una carga de 30 toneladas por eje como modelo de vehículo. En la Ilustración 13 se puede la representación de la carga dinámica transmitida por la iteración entre el carril y la traviesa debido al paso del material rodante circulando a velocidad de 80 km/h.

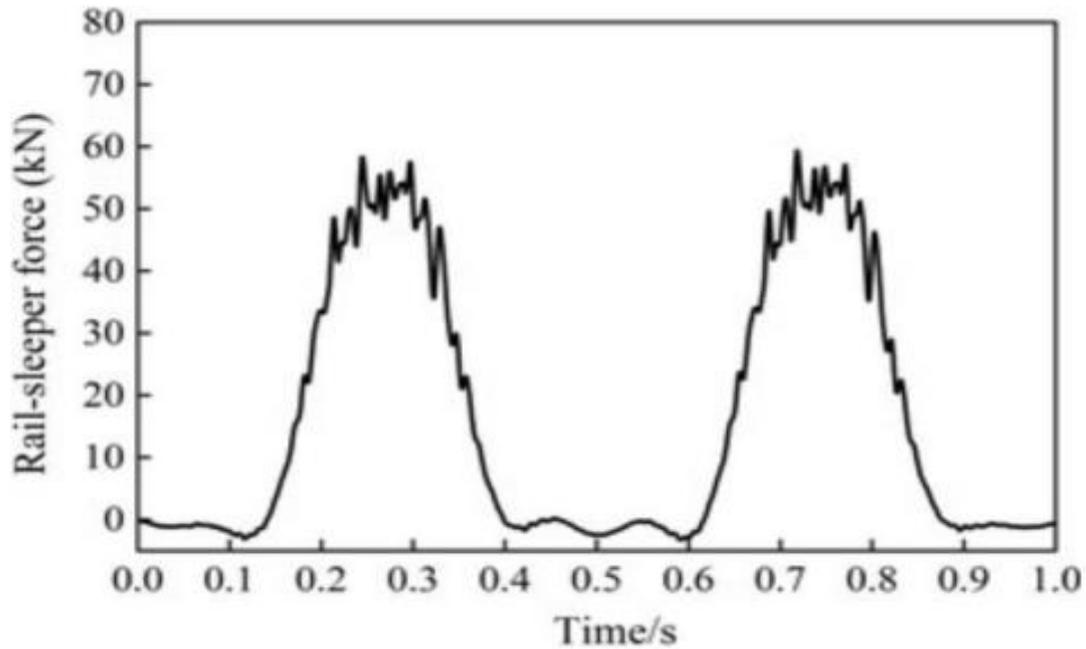


Ilustración 13. Gráfica donde se representa la variación de la fuerza transmitida en función del tiempo en la iteración travesía y carril. (Zhang et al., 2017)

Para el caso en particular de España, en el estudio de (Irazábal González, 2017) se presenta la aplicación de fuerzas dinámicas en el balasto utilizando el mismo modelo de material rodante utilizado en la red ferroviaria de Alta Velocidad en España. Específicamente, se utiliza un tren de alta velocidad de la Serie 100 de Renfe viajando a una velocidad de 300 km/h. La Ilustración 14 muestra la geometría de dicho material rodante basado en las especificaciones técnicas que ofrece Renfe.

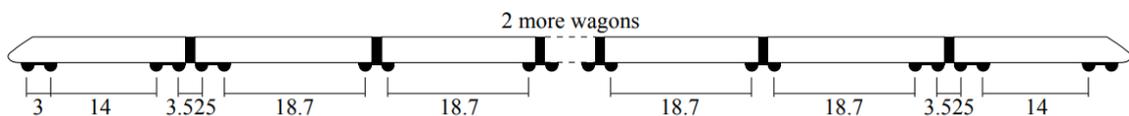


Ilustración 14. Representación de un Serie 100 de Renfe. Cotas en metros. (Irazábal González, 2017)

Al calcular la carga aplicada al balasto, se toma en cuenta la combinación del peso de la traviesa, del carril y de la carga que cada eje de un bogie transmite al pasar. Los autores sugieren utilizar la Ecuación 1 para calcular la carga que un eje A ejerce sobre una traviesa B específica. Antes de aplicar la ecuación, es necesario conocer la rigidez total de la vía o coeficiente de balasto, K , la rigidez de los elementos sobre la traviesa, k_{eq} , y la longitud elástica, L .

$$Q_{AB}(x, t) = Q_A * \frac{K_{eq}}{K} * e^{\frac{-|x-vt|}{L}} * \left[\cos \frac{|x - vt|}{L} + \sin \frac{|x - vt|}{L} \right]$$

Ecuación 1. Cálculo de la carga de un eje sobre una traviesa específica.

3 METODOLOGÍA

3.1 Descripción general

En esta sección se busca explicar de manera amplia el procedimiento utilizado en la creación de un modelo numérico de la capa de balasto ferroviaria, además de las pautas seguidas en su validación y uso en el tramo ferroviario entre Valencia y Sagunto. Se presenta en la Ilustración 15 un diagrama de flujo que resume el enfoque metodológico seleccionado.

Una vez estudiada y analizada la literatura relacionada con el comportamiento de la capa de balasto se puede pasar al desarrollo del modelo. Incluir las características específicas del tramo entre Valencia y Sagunto ayuda a validar los datos obtenidos de los trabajos de campo realizados en ese tramo. Una vez que el modelo tenga una rigidez del balasto acorde con los datos de campo, se considerará válido para representar el comportamiento de este. Esto permitirá su aplicación en diversos casos de carga para analizar su respuesta ante diferentes solicitaciones externas.

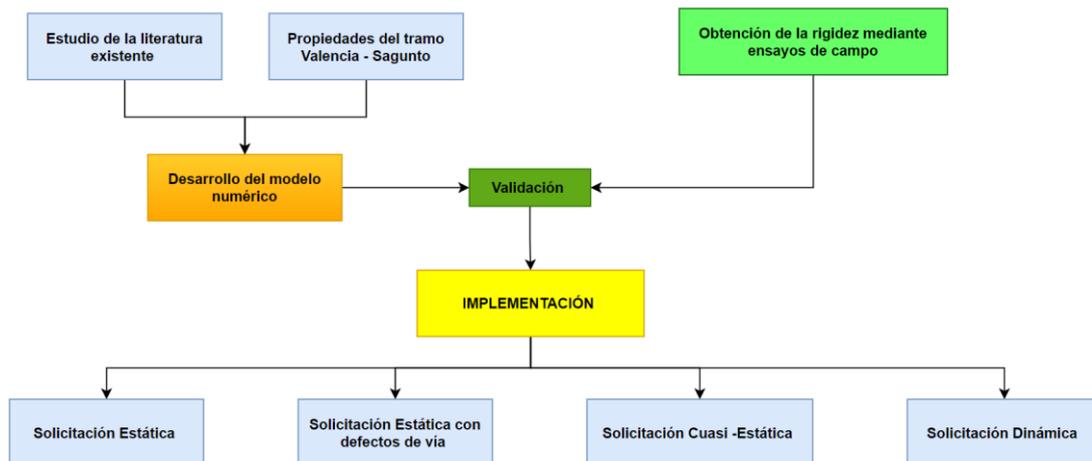


Ilustración 15. Representación de la metodología llevada a cabo para el desarrollo del modelo. (Elaboración propia)

3.2 Obtención de la rigidez de la capa de balasto

Para validar el correcto comportamiento de la capa de balasto mediante el desarrollo de del modelo es necesario la obtención de los datos de campo mediante la realización de ensayos. Para el presente trabajo se ha optado como criterio de comprobación del modelo la rigidez de la capa de balasto.

3.2.1 Localización del tramo de estudio

La línea ferroviaria sobre la cual se va a realizar el estudio es la línea Valencia-Cambiador de la Boella la cual es una línea que conecta Valencia con el sur de Cataluña, más en concreto con Tarragona. Dicha línea tiene una extensión de 254,1 km y esta denominada según Adif como línea 600. Dicha línea cuenta en su mayoría con ancho ibérico exceptuando los 73 km que van desde la Bifurcación Joaquín Sorolla hasta Castellón de la Plana. Dado que el principal objetivo de este proyecto es comparar el comportamiento de la capa de balasto en función de si el material rodante circula por ancho estándar o ibérico, el trabajo se centrará en el tramo comprendido entre Valencia y Sagunto. El tramo entre Valencia y Sagunto tiene una extensión de 28,48 km en vía de ancho mixto.

Para realizar los ensayos para obtener la rigidez de la capa de balasto se han realizado las mediciones en las proximidades de la estación de Massalfassar cuyo punto kilométrico es el 15,2 siendo Valencia-Estación del Norte el punto kilométrico 0,0 y Tarragona el 275,6. Estas mediciones se ha realizado sobre una vía normal y un tramo de desvío de esta que se encuentra en dirección Sagunto. En la Ilustración 16 se muestra una vista satelital de tramo de estudio y la estación correspondiente.

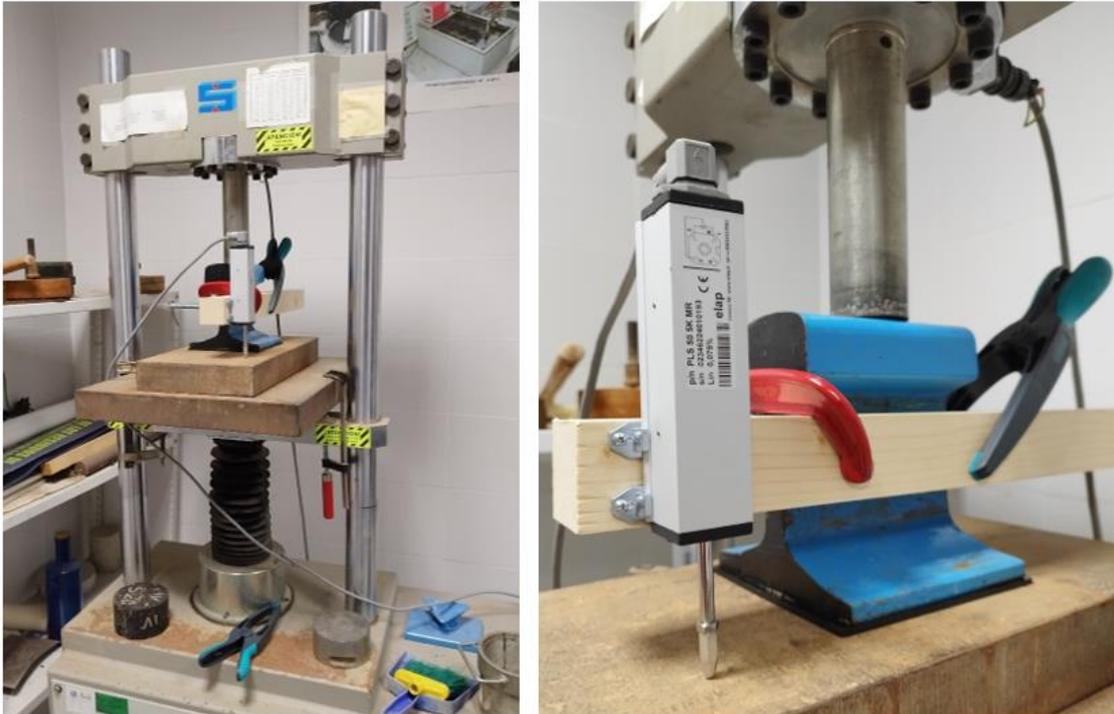


Ilustración 16. Ortofotografía de la estación de Massalfassar. (Elaboración propia a partir de Google Earth)

3.2.2 Calibración de los sensores de medición

Antes de realizar las mediciones en campo es necesario montar, probar y calibrar los sensores los cuales se utilizarán para la toma de datos en la propia vía. Para esto, se han montado 16 sensores para medir descensos y aceleraciones tras el paso del material rodante en la vía de ancho mixto. Una vez montados los sensores con sus respectivos cables para la toma de datos es necesario comprobar que todos ellos funcionan correctamente. Para ello se ha recurrido a

realizar unas pruebas con una prensa electrónica la cual permite regular la carga estática que se le aplica al carril al cual está sujeto el sensor que medirá la deformación de la placa de asiento. En la Ilustración 17 se puede ver una vista general de la prensa y a su lado un zoom en el cual se puede visualizar el pistón de carga de la prensa, un carril y el sensor.



*Ilustración 17. Representación del proceso de calibrado de los sensores potenciométricos en laboratorio.
(Elaboración propia)*

Al ser una prensa electrónica se puede monitorear en tiempo real la carga que se está aplicando en el carril y el descenso del pistón de la traviesa. Estos datos se recogen en un programa informático el cual se muestra en la Ilustración 18 en el cual se puede observar la carga que se está aplicando en ese momento y el descenso recorrido por el pistón. Para comprobar que los sensores están bien calibrados el sensor está conectado por un cable a otro ordenador el cual recoge el descenso del pistón del sensor, por lo tanto, se da al sensor como bien calibrado cuando el descenso del pistón de la prensa coincide con el descenso del pistón del sensor. Este proceso se realiza de manera iterativa con los 16 sensores hasta que todos ellos están correctamente calibrados y aptos para ser usados en el tramo real de la vía.

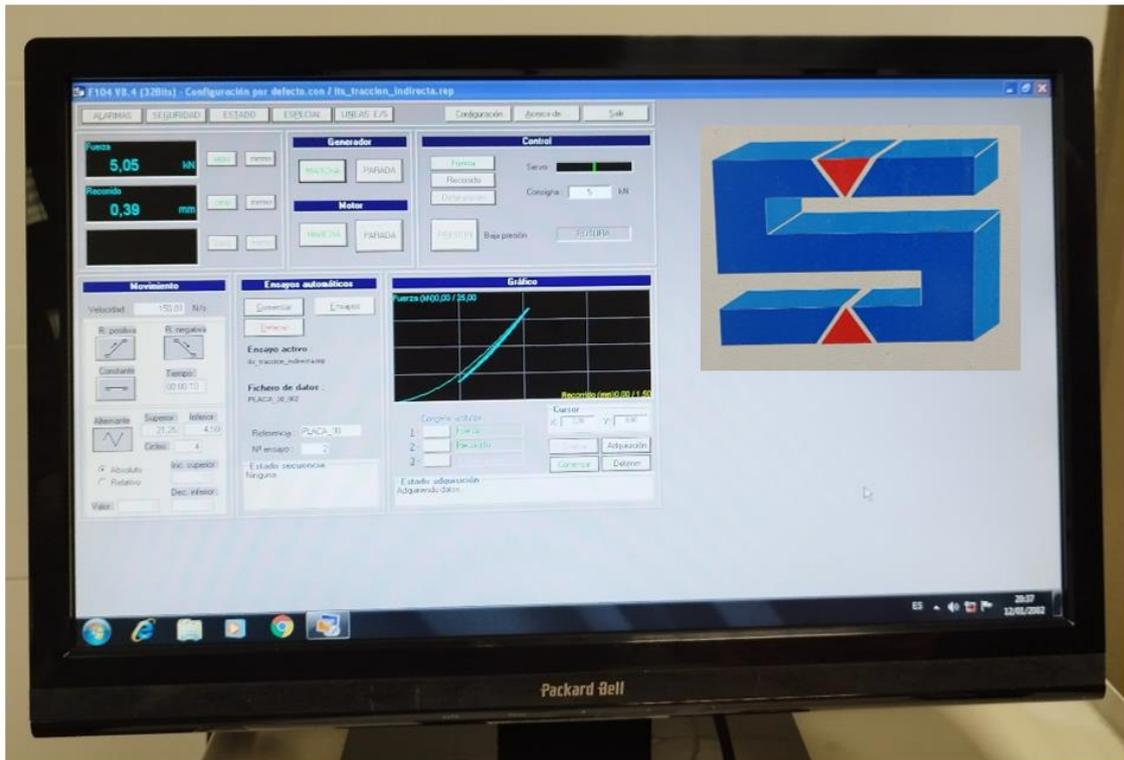


Ilustración 18. Ordenador conectado a la prensa eléctrica para el monitoreo de esta y la recogida de datos.
(Elaboración propia)

3.2.3 Realización del ensayo de campo

El montaje de los sensores para la toma de datos en el ensayo de campo se montó durante la noche en el cual no hay tráfico ferroviario. Dichos sensores y el portátil de almacenamiento de datos se dejaron montados durante un día entero para que tomase una gran cantidad de la muestra. Al realizar las mediciones durante un día completo nos aseguramos de que estamos tomando una representación significativa del tráfico real que tiene la vía. El equipo utilizado para la toma de datos está conformado por:

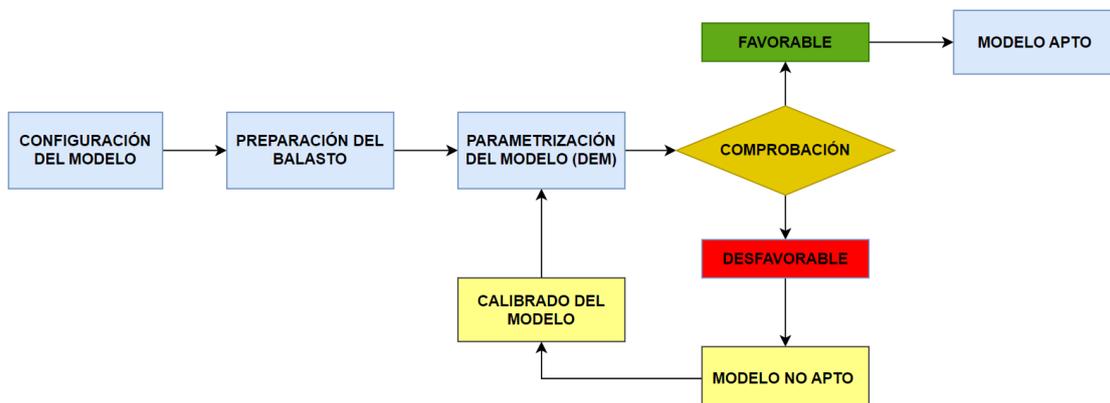
- Sensores de desplazamiento potenciométricos
- Aparatos de adaptación de señales
- Ordenador portátil de campo
- Baterías externas
- Cámara de grabación



Il·lustració 19. Material emprat per a la realització del ensay de camp per a la recollida de dades. (Elaboració pròpia)

3.3 Simulació numèrica

La creació del model per al càlcul numèric de balasto se lleva a cabo utilitzant el programa YADE. Este software de código abierto utiliza los algoritmos del Método de Elementos Discretos para crear escenas y analizar sus resultados. La Ilustración 19 presenta de forma esquemática los pasos seguidos en la creación del modelo numérico. El proceso de calibración del modelo se lleva a cabo de manera iterativa hasta lograr una solución que cumpla con los estándares requeridos para su aceptación.



Il·lustració 20. Esquema seguit per a la creació del model de simulació numèrica. (Elaboració pròpia)

3.3.1 Configuración del modelo

El inicio del proceso de crear el modelo implica identificar los atributos que lo caracterizan. En esta situación, se elige una disposición geométrica que se parece al segmento donde se aplicará el modelo en la práctica posteriormente. Ya que el enfoque del modelo propuesto se encuentra en la conducta del balasto comparando las diferencias que se puedan producir dependiendo del ancho de vía (ancho estándar y ancho ibérico), solo se incorporan directamente el balasto y las traviesas de todos los componentes de una vía férrea. La Tabla 2 muestra una lista de las características consideradas para definir el modelo.

Capa de Balasto	Largo	Se entiende como largo en el modelo a la dimensión de la capa de balasto a lo largo del eje de la vía.
	Ancho	Dimensión transversal al eje de la vía.
	Espesor	Establecido el mínimo necesario por las normas técnicas de Adif.
	Taludes	Pendiente que presenta el balasto al dejarse caer en los laterales de la vía.
	Granulometría	Proporción en peso de los diferentes tamaños de las piedras de balasto.
Traviesas	Cantidad	A mayor número de traviesas, mayor tiempo de cálculo de la simulación. En este caso se ha optado por realizar el modelo con una única traviesa.
	Forma	La geometría de la traviesa se ha tomado como modelo la AM-05.
	Material	Para este modelo se ha optado por una traviesa de hormigón dado que son las más comunes en España, aunque también hay de acero o incluso madera.
Modelo DEM	Condiciones de Contorno	Descripción del comportamiento de los límites del modelo.
	Forma de las Partículas	Forma geométrica usada para simplificar la representación de las piedras de balasto.
	Modelo de Contacto	Tipo de ley fundamental que regulará las relaciones entre los diferentes componentes del modelo.

Tabla 2. Características de los materiales y del modelo DEM. (Elaboración propia)

3.3.2 Preparación del balasto

La preparación de la muestra de balasto incluye todos los pasos en el modelo que buscan lograr una capa de balasto con las cualidades necesarias para su validación. En resumen, nos permite obtener una capa de balasto con las características geométricas previamente establecidas.

Para el trabajo actual, dada su relevante aplicación práctica, se ha decidido proponer una preparación del modelo que se asemeje al proceso común de colocación y compactación del balasto, como se muestra en la Ilustración 20, excluyendo el bateo y la estabilización dinámica dada su alta complejidad de implementación en un programa de Métodos de Elementos Discretos.

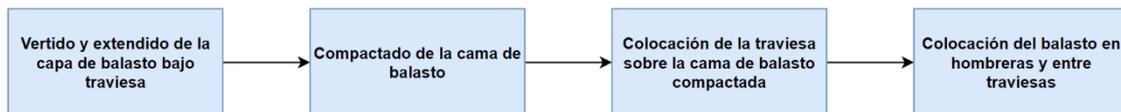


Ilustración 21. Diagrama del proceso de colocación del balasto en obra. (Elaboración propia)

3.3.3 Parametrización del modelo

En las simulaciones con el Método de Elementos Discretos, ciertos parámetros afectan directamente el comportamiento mecánico de las partículas. Estos valores necesitan ser modificados para que el modelo pueda reflejar correctamente la realidad. Para ello, se lleva a cabo un análisis paramétrico para ajustar adecuadamente estos valores, modificando gradualmente los factores hasta alcanzar un conjunto óptimo que refleje el comportamiento deseado. Es importante mencionar que, al ser una representación matemática de un fenómeno real, los valores de parámetros como el módulo de Young y el coeficiente de Poisson no siempre coincidirán exactamente con los del material real. A continuación, en la Tabla 3, se muestran los principales parámetros los cuales se han ordenado en la tabla siguiente el mismo orden que en el código realizado para la simulación.

Amortiguamiento (Damping)	Se entiende como Damping al amortiguamiento virtual, que no tiene relevancia física, el cual se aplica a todos los componentes del sistema con el fin de lograr la estabilidad. Es un parámetro necesario para la simulación del balasto en el Método de Elementos Discretos.
Módulo de Young del balasto	En las simulaciones de Elementos Discretos se establece la cantidad de superposición entre partículas y las fuerzas actuantes en la dirección perpendicular a estas. A mayor valor, más tiempo de computación se requiere.
Coefficiente de Poisson del balasto	Este coeficiente permite el análisis del comportamiento de las partículas de balasto frente a las fuerzas tangenciales actuantes.
Ángulo de rozamiento interno	El ángulo de rozamiento interno está estrechamente ligado con el ángulo máximo que puede tener la pendiente de los taludes.
Intervalo de cálculo (Timestep)	Es el tiempo medido en segundos en el cual se ejecutan todos los cálculos necesarios para realizar una iteración en el modelo.

Tabla 3. Parámetros fundamentales para determinar el comportamiento del balasto en el modelo. (Elaboración propia)

3.3.4 Calibración y comprobación del modelo

Es fundamental comprobar que el modelo de simulación del comportamiento del balasto en el tramo Valencia - Sagunto puede reflejar adecuadamente el comportamiento real de la capa de balasto. Por este motivo, se realiza un proceso iterativo de calibración y validación del modelo hasta obtener finalmente los resultados correctos. Se considerará que dicho modelo es válido si la rigidez de la capa de balasto al soportar una carga estática en la traviesa concuerda razonablemente con los datos obtenidos de los ensayos en el campo. Se llevan a cabo varias iteraciones con diferentes valores de los parámetros establecidos previamente hasta lograr la correspondencia deseada, momento en el cual el modelo estará calibrado.

3.4 Casos de carga a estudiar

Una vez comprobada la eficacia del modelo numérico para simular el comportamiento del balasto, se realizan varios casos de carga para estudiar cómo responde la capa de balasto dependiendo si el material rodante circula en ancho estándar o ancho ibérico en el tramo ferroviario Valencia-Sagunto. Una vez hecho esto se le puede someter a la vía a diferentes casos de carga en los que se analizará la respuesta de la capa de balasto antes las diversas solicitaciones como se puede observar en la Tabla 4. Para esto se ha optado por seguir la siguiente lista para cada uno de los casos de carga:

1. Determinar la magnitud de las cargas a aplicar, dependerán del caso de carga en el cual nos encontremos.
2. Determinar la distribución de la carga en la traviesa, esta variará en el caso número dos.
3. Realización de la simulación mediante el modelo numérico para observar el comportamiento de la capa de balasto y la traviesa.
4. Procesado de los datos proporcionados por el modelo numérico.
5. Conclusiones del análisis de los resultados obtenidos

	Tipo de Carga	Resultados
Caso 1	Solicitud Estática	Descenso de la traviesa
		Desplazamiento de las partículas de balasto
		Velocidades de las partículas de balasto
		Cadena de fuerzas del balasto
Caso 2	Solicitud Estática con defectos en la vía	Descenso de la traviesa
		Desplazamiento de las partículas de balasto
		Velocidades de las partículas de balasto
		Cadena de fuerzas del balasto
Caso 3	Solicitud cuasi - estática	Descenso de la traviesa
		Desplazamiento de las partículas de balasto
		Velocidades de las partículas de balasto
		Cadena de fuerzas del balasto
Caso 4	Solicitud Dinámica	Descenso de la traviesa
		Desplazamiento de las partículas de balasto
		Velocidades de las partículas de balasto
		Cadena de fuerzas del balasto
Caso 5	STPT	Dado que el objetivo principal de este proyecto es comparar las diferencias que puedan ocurrir en la capa de balasto dependiendo de si el material rodante circula por ancho estándar o ibérico se ha optado por no realizar el ensayo de carga lateral STPT ya que este no influye al tener un ancho u otro sino por el tipo de traviesa.

Tabla 4. Tipo de solicitud y resultados obtenidos para cada caso. (Elaboración Propia)

4 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL TRAMO DE ESTUDIO

4.1 Marco general

El desarrollo, validación y aplicación del modelo numérico de comportamiento de la capa de balasto propuesto en este estudio se centra en el tramo ferroviario entre Valencia y Sagunto. Esta sección pertenece a la Red Ferroviaria de Interés General (RFIG), la cual incluye "las infraestructuras ferroviarias, las estaciones de pasajeros y los centros de transporte de mercancías necesarios para asegurar un sistema de transporte ferroviario uniforme en toda la jurisdicción del Estado", como establece el Artículo 4 de la Ley 38/2015 del sector ferroviario.

En concreto el tramo de estudio forma parte de la Línea 600 de Adif la cual conecta las estaciones de Valencia – Estación del Norte y Tarragona – Cambiador de la Boella, pasando por algunas estaciones como Sagunto, Castellón de la Plana, Aldea-Amposta-Tortosa entre otras. En la Tabla 5 se recogen las principales características del tramo de estudio.

LINEA 600 ADIF		
TRAMO VALENCIA ESTACIÓN DEL NORTE - SAGUNTO		
Estación de Origen	Nombre	Valencia – Estación del Norte
	Punto kilométrico (PK)	0+000
Estación de Destino	Nombre	Sagunto
	Punto kilométrico (PK)	29+200
Longitud	29,2 km	
Ancho de vía	Vía de ancho mixto (1435mm / 1668mm)	
Electrificación	3 kV en corriente continua	
Velocidad Máxima	160 km / h (*) Ver pie de tabla	
Categoría de la línea	D4	
	Masa máxima por eje	22,5 t / eje
Rampa Característica	Sentido Par	11 milésimas
	Sentido Impar	14 milésimas
Longitud Máxima Trenes	Básica	500 m
	Especial	550 m
Sistema Automático de Control	ASFA (Anuncio de Señales y Frenado Automático)	

Tabla 5. Principales características del tramo Valencia – Sagunto. (Elaboración propia con los datos obtenidos en la declaración sobre la red 2025 de Adif)

(*) La velocidad máxima en este tramo, al contar con vía de ancho mixto y travesía AM-05 queda limitado operacionalmente, según las especificaciones de Adif, a 160 km/h para todo material rodante que pueda superar dicha velocidad ya que no se han realizado pruebas en vía a más de esta velocidad para vía de tres carriles.

4.2 Valor estratégico

El tramo Valencia - Sagunto es fundamental para el acceso ferroviario a Valencia y para facilitar el transporte de personas y productos a lo largo del eje mediterráneo. Se muestra en la Ilustración 21 un esquema de las conexiones principales que se analizarán en el tramo abordado en este estudio. Se puede observar cómo el tramo une los principales puntos de tráfico de la zona, como las capitales de provincia y los puertos más importantes de la costa mediterránea.

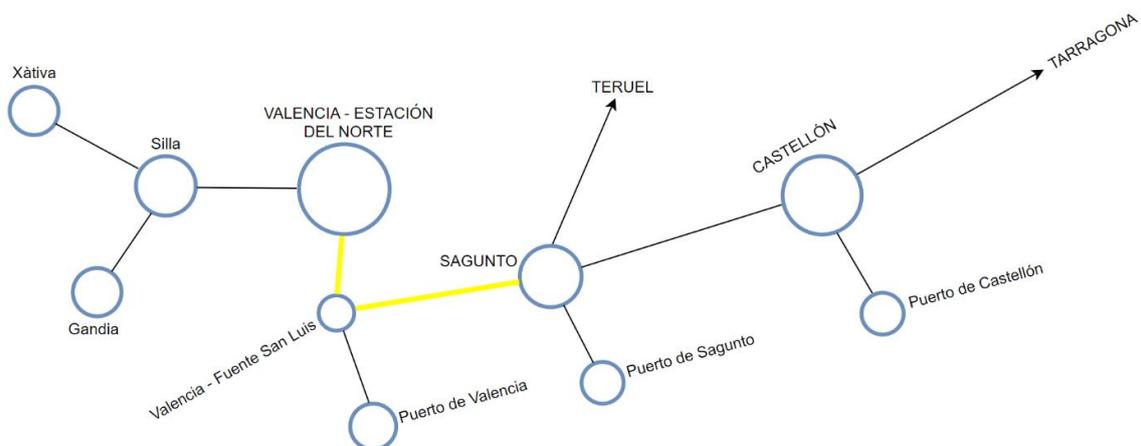


Ilustración 22. Red de las principales conexiones y estaciones en las que interviene el tramo de estudio. De color amarillo se ha representado el tramo de estudio. (Elaboración propia)

Hoy en día, se está promoviendo el uso del transporte ferroviario, especialmente para el transporte de mercancías, por ser visto como una alternativa más respetuosa con el medio ambiente que el transporte de carretera mediante el uso de camiones. Para lograrlo, se han introducido diferentes proyectos como Mercancías 30, que coincide con las propuestas del Eje 6 de la Estrategia de Movilidad Segura, Sostenible y Conectada 2030 del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.

En estas estrategias se proponen medidas como la creación de estaciones y apartaderos para permitir el paso de trenes de hasta 750 metros de longitud, así como la implementación de autopistas ferroviarias para complementar el transporte por carretera y ferrocarril. Con respecto a esto, la línea 600 de Adif, la cual es la que se estudia en el presente trabajo, no tiene la capacidad aun de albergar trenes de 750 metros ya que las estaciones y apartaderos solo están limitados para longitudes de trenes de mercancías a 550 metros en transporte especial. Esto es

4.3.2 Balasto

Las líneas dentro de la Red Ferroviaria de Interés General deben seguir las normas, establecidas por "NAV 3-4-1.0" la cual regula las características del diseño de la banqueta y la correspondiente colocación del balasto, y la especificación técnica "ET 03.360.004.0" determina las propiedades que debe de tener un árido para ser empleado como balasto ferroviario. Esta última norma, además de determinar las propiedades del árido también establece el uso granulométrico que debe tener el árido para que se apto para utilizarse como balasto.

En la Tabla 6 se muestran la curva granulométrica del balasto con los porcentajes que pasan por los diferentes tamices.

Curva granulométrica del balasto	
Tamaño de tamiz (mm)	% que pasa (en peso)
63	100
50	70-99
40	30-65
31,5	1-25
22,4	0-3 (para recepción de lotes situados en el centro de producción)
	0-5 (para recepción de lotes situados en obra o acopio intermedio)

Tabla 6. Curva granulométrica del balasto. (Adif)

4.3.3 Traviesas

En el tramo ferroviario Valencia – Sagunto el tipo de traviesa que se usa actualmente es la traviesa monobloque de hormigón pretensado de la clasificación AM-05 como se puede observar en la Ilustración 23. Las características tanto geométricas como técnicas que deben de cumplir este tipo de traviesas están reguladas según la normativa "NAV 3-1-2.1" la cual es para traviesas monobloque de hormigón. En el ANEJO N°2: Plano de la traviesa AM-05 se muestran todas las dimensiones y detalles de este tipo de traviesa, así como de las sujeciones correspondientes.



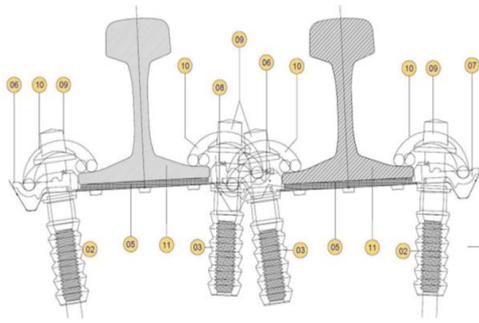
Ilustración 24. Tramo de la vía en donde se aprecian las traviesas AM-05 y la vía de tres carriles. (Elaboración propia)

Esta clase de traviesas recibe el nombre de multimodal, ya que pueden ser utilizadas para vías de tres carriles, es decir, este tipo de traviesas tiene la peculiaridad de que pueden albergar una vía de ancho estándar de 1435 mm y una vía de ancho ibérico de 1668 mm. Esta flexibilidad las ha llevado a ser instaladas en distintas vías del territorio español ya que permite la circulación de trenes de distintos anchos.

A continuación, se establecen las medidas requeridas para estas traviesas, además de especificar el perfil del carril permitido y el método de sujeción correspondiente para su correcta instalación.

- Longitud: 2750 mm.
- Peso aproximado: 410 Kg.
- Anchura máxima en la base: 300 mm.
- Altura en la sección central: 210 mm.
- Altura en la sección bajo eje de carril: 232 mm.
- Altura de la traviesa en los extremos: 240 mm.
- Carril admitido: 54 E1 ó 60 E1.
- Tipo de sujeción: V0
- Altura en la sección bajo eje de carril: 232 mm.

La sujeción, queda formada por tirafondos T – 2 , vaina V2, placa de asiento PAE – 1 ó PAE – Z54, una placa acodalada ligera y un clip Vossloh tipo SKL – 1 como se puede observar en la Ilustración 24.



MARCA	DESCRIPCIÓN	CANT.	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA O NORMA LINE	Nº DE PLANO Y/O MATRÍCULA RENFE	MATERIAL	MASA Kg.
01	Travesa AM-05 EA PRECON	1		P16.5260.00		
02	Vaina V2 para sujeción VM	4		P16.5073.00 60.721.153	Poliamida 66 +30% F. V Negra	
03	Vaina PLASTIRAIL Z2-115	2		P16.4502.00 60.530.206	Poliamida 66 +30% F. V Negra	
04	Placa de asiento PAE-1 para sujeción VM UIC-54	1		P16.5075.00 60.721.054	Poliéster termoplástico	
05	Placa de asiento PAE-234 para sujeción VM UIC-54	2		P16.5263.00	Poliéster termoplástico	
06	Placa acodada ligera de sujeción. A2I-54	3	ET.03.360.578.3	P16.4962.00 60.740.210	Poliamida 66 +35% F. Vidrio	
07	Placa acodada ligera de sujeción. A2E-54	2	ET.03.360.578.3	P16.4963.00 60.740.200	Poliamida 66 +35% F. Vidrio	
08	Placa acodada ligera de sujeción. A2IE-54I-2.5	1	ET.03.360.578.3	P16.4963.00 60.740.202	Poliamida 66 +35% F. Vidrio	
09	Tomillo T-2 para sujeción VM	6		P16.5072.00 60.730.010	S.6 une en ISO 898-1	
10	Clip elástico SKL-1	6	ET.03.360.564.3	P16.0069.00 60.710.000	40 S17	
11	Carril 60 E-1	3				

Ilustración 25. Representación de las sujeciones de la zona de doble carril de la traviesa y tabla con su descripción. (Escola de Camins UPC)

4.3.4 Carriles

En España, al igual que con otros elementos de la superestructura, Adif ha definido las características que deben cumplir los carriles de la Red Ferroviaria de Interés General en la especificación técnica "ET 03.360.161.8".

En el tramo ferroviario comprendido entre Valencia y Sagunto se emplea el tipo de carril 60 E1 el cual es utilizado por tener una mayor capacidad de carga al tratarse de una zona donde el tráfico de mercancías es bastante elevado. En la Ilustración 25 se puede observar las dimensiones geométricas y mecánicas de este carril.

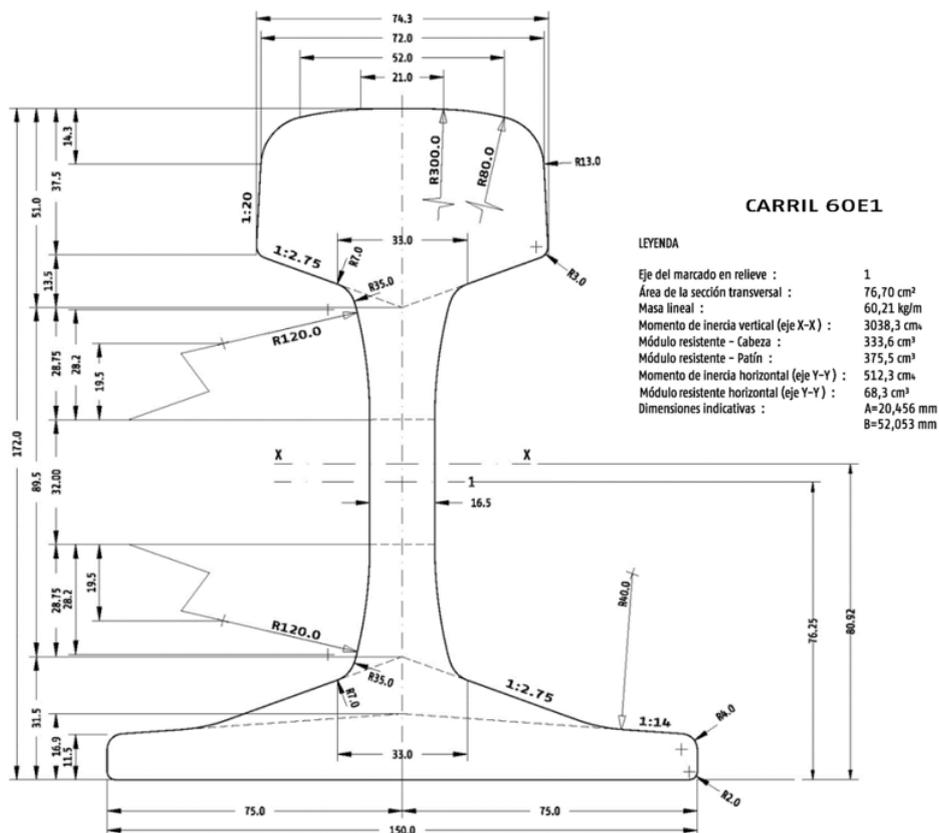


Ilustración 26. Sección transversal con las dimensiones geométricas de un carril 60 E1. (Adif)

4.4 Tipologías de tráfico

El propósito de este apartado es examinar las distintas categorías de vehículos ferroviarios que circulan entre Valencia y Sagunto, centrándose en aspectos que sean clave para el análisis del comportamiento del balasto, como las características del material rodante y las frecuencias de paso.

En general, de acuerdo con los datos de capacidad de las diferentes líneas proporcionados por Adif en la declaración sobre la red 2025, la capacidad promedio de la Línea 600 a la que pertenece el tramo es de 276 trenes al día. Además, la cantidad promedio de tráfico actual es de 68 trenes por día en situaciones normales, lo que significa que la línea está alrededor del 25% de su capacidad total, con 208 espacios libres para la circulación de más trenes.

Tal y como se mencionó anteriormente, el tramo ferroviario entre Valencia y Sagunto tiene una amplia diversidad de trenes en circulación gracias a su ubicación estratégica en el corredor mediterráneo. Esto hace que la infraestructura ferroviaria esté expuesta a cargas con una gran variedad en términos de su magnitud y frecuencia. A continuación, se presenta un breve resumen de los servicios principales que transitan por la sección, centrándose en los aspectos más destacados en relación con el desarrollo del comportamiento del balasto. Cabe destacar que por esta línea 600 de Adif circulan trenes de las líneas de Cercanías, Media Distancia, y trenes de Larga Distancia. Además, hay una elevada circulación de trenes de mercancías al tratarse de zonas en donde la mayoría de los materiales se mueve a través de vagones proveniente de los puertos.

4.4.1 Servicio de cercanías

El tramo ferroviario comprendido entre Valencia y Sagunto es uno de los ejes del servicio de cercanías de Valencia. El tramo cuenta con 5 estaciones para la línea C5 y 9 estaciones para la línea C6. Mas concretamente la línea C5 comprende Valencia Estación del Norte – Caudiel y la línea C6 comprende Valencia Estación del Norte – Castellón. A continuación, en la Tabla 7 se representan las circulaciones para cada línea de cercanías en un día común.

LÍNEA	TRAYECTO	IDA	VUELTA
C - 5	Valencia Estación del Norte – Caudiel	10	5
C - 6	Valencia Estación del Norte – Castellón	39	40
	TOTAL	49	45
		94	

Tabla 7. Circulaciones en un día laborable en las líneas de cercanías C-5 y C-6. (Elaboración propia a partir de datos de www.renfe.com)

El trayecto por las líneas de cercanías C-5 y C-6 de Valencia hasta Caudiel y Castellón respectivamente se realiza a través del servicio de Renfe. Para estos trayectos se emplean los trenes de las series 447 y en algunas ocasiones el 464 el cual pertenece a la familia de Civia. A continuación, se muestra en la Tabla 8 las principales características del material rodante mencionado anteriormente. Obsérvese que las características que se introducirán en las siguientes tablas son las necesarias para simular el paso de trenes en el modelo, por lo tanto, únicamente se considerara la velocidad máxima del vehículo y el peso máximo por eje que este puede soportar, además de la distancia entre ejes.

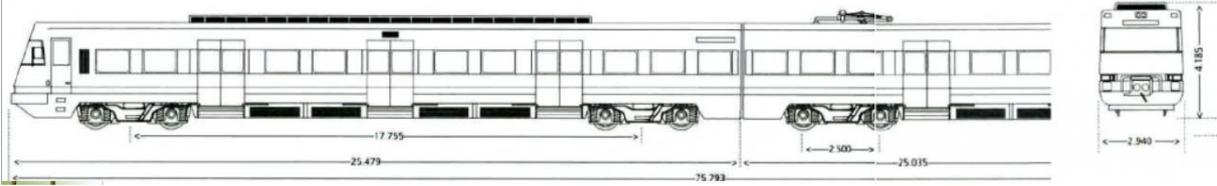
TIPOLOGÍA MATERIAL RODANTE	
Serie 447	
Velocidad máxima	120 km/h
Peso máximo	14,18 t/eje
	
Serie 464 (Civia)	
Velocidad máxima	120 km/h
Peso máximo	15,4 t/eje
	

Tabla 8. Características del material motor utilizado en los trayectos de Cercanías. (Elaboración propia a partir de las ilustraciones de www.listadotren.es)

4.4.2 Servicio de Media Distancia

En el tráfico ferroviario del tramo Valencia – Sagunto, los trayectos realizaos a través del servicio de Media Distancia, el cual conecta Valencia con ciudades próximas conlleva una pequeña afección con lo relevante a las frecuencias de paso como se representa en la Tabla 9.

TRAYECTO	IDA	VUELTA
Valencia Estación del Norte - Sagunto - Teruel	3	3
Valencia Estación del Norte - Sagunto - Castellón	6	6
TOTAL	9	9
	18	

Tabla 9. Número de circulaciones en un día laborable en el servicio de Media Distancia en el tramo Valencia – Sagunto. (Elaboración propia a partir de datos de www.renfe.com)

Los trayectos más largos en estos servicios necesitan trenes específicos siendo los más populares son los trenes eléctricos de las series 449 y 470, los cuales son ofrecidos por Renfe bajo el nombre de Regional Exprés al realizar un menor número de paradas en comparación con el Regional. En los viajes a destinos como Teruel, donde no hay infraestructura eléctrica, se utilizan trenes de las series 592, 596 y 599 los cuales funcionan con diésel. Dicha información se encuentra recogida en la Tabla 10.

TIPOLOGÍA MATERIAL MOTOR	
Serie 449	
Velocidad máxima	160 km/h
Peso máximo	14,33 t/eje
	
Serie 470	
Velocidad máxima	140 km/h
Peso máximo	14,77 t/eje

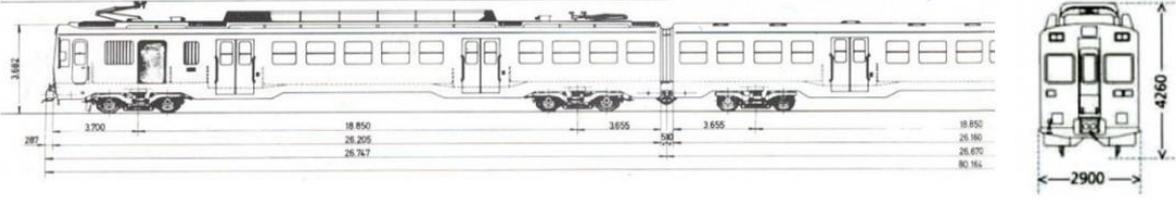
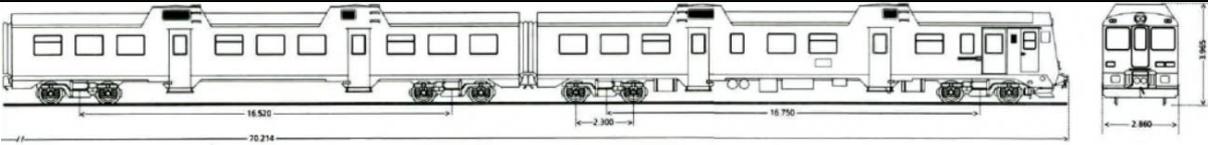
	
Serie 592	
Velocidad máxima	120 km/h
Peso máximo	12 t/eje
	
Serie 599	
Velocidad máxima	160 km/h
Peso máximo	13,1 t/eje
	

Tabla 10. Características del material motor utilizado en los trayectos de Media Distancia. (Elaboración propia a partir de las ilustraciones de www.listadotren.es y www.renfe.com)

4.4.3 Servicio de Larga Distancia

Los servicios de Larga Distancia son servicios comerciales que no están subvencionados por el Estado y su rentabilidad depende del número de circulaciones, a diferencia de los dos servicios considerados anteriormente los cuales son de Obligación de Servicio Público. Por esa razón, actualmente, los servicios de Larga Distancia solo operan en destinos sin conexión directa de alta velocidad. A continuación, en la Tabla 11 se recogen las distintas conexiones en Larga Distancia.

TRAYECTO	IDA	VUELTA
Barcelona – Valencia Estación del Norte – Alicante – Murcia	2	2
Barcelona – Valencia Estación del Norte – Córdoba (Torre del Oro)	1	1
TOTAL	3	3
	6	

Tabla 11. Número de circulaciones un día laboral en el trayecto de Larga Distancia en el tramo Valencia – Sagunto. (Elaboración propia a partir de www.renfe.com)

En los servicios de Larga Distancia vinculados con este tramo, se suelen utilizar locomotoras de las Series 252 y 334 dependiendo de si se viaja por líneas electrificadas o no, las cuales remolcan composiciones de coches de la marca Talgo. En este tipo de recorridos, es común usar la Serie 120 o 130. En la ruta Valencia - Sagunto, es importante destacar el uso de vehículos de la Serie 130 los cuales cuentan con bogies de rodadura desplazables que les permiten operar en diferentes anchos para el servicio Torre del Oro de Barcelona a Córdoba. En la Tabla 12 se presentan las características principales de los automotores y locomotoras utilizadas en estos servicios. Además, se incluye un coche Talgo con el propósito de tener una idea general de las especificaciones geométricas de esta clase de vehículos.

TIPOLOGÍA MATERIAL RODANTE	
Serie 120	
Velocidad máxima	250 km/h
Peso máximo	14,1 t/eje
	

Serie 130	
Velocidad máxima	250 km/h
Peso máximo	18 t/eje
Peso máximo remolcado	17,5 t/eje
Serie 252	
Velocidad máxima	220 km/h
Peso máximo	22,5 t/eje
Remolque Talgo TA6-601 1ª clase	
Velocidad máxima	200 km/h
Peso máximo	13,9 t/eje

Tabla 12. Características del material motor utilizado en los trayectos de Larga Distancia. (Elaboración propia a partir de las ilustraciones de www.listadotren.es y www.renfe.com)

4.4.4 Transporte de mercancías

Es complicado delimitar la frecuencia de los trenes de carga que pasan por el tramo Valencia - Sagunto debido a que el transporte de mercancías no es muy común en España, aunque en los últimos años está aumentando el número de mercancías transportadas por ferrocarril. No obstante, se deduce de lo mencionado anteriormente sobre la relevancia estratégica del tramo que la presencia de múltiples puntos de origen de mercancías y terminales intermodales en la zona somete al tramo a demandas significativas por parte de los trenes de mercancías.

La liberalización del transporte ferroviario de mercancías en 2005 ha hecho que sea aún más difícil determinar las frecuencias de paso de los trenes de carga, ya que ahora circulan una gran variedad de vagones y locomotoras en el tramo.

El estudio de los efectos de los trenes de carga en la capa de balasto es de gran interés debido a las grandes cargas por eje que transmiten a la infraestructura. Se presenta en la Tabla 13 los elementos de una formación de un tren de mercancías de Renfe para dar una idea de las cargas que transportan estos vehículos. Se suelen utilizar una o varias locomotoras de la Serie 251 o 253, estas últimas más modernas, como cabezas tractoras para remolcar plataformas MMP que transportan cargas contenedores o semirremolques.

TIPOLOGÍA MATERIAL RODANTE	
Serie 253	
Velocidad máxima	140 km/h
Peso máximo	22,5 t/eje



Plataforma MPP	
Velocidad máxima	120 km/h
Peso máximo	22,5 t/eje
	

Tabla 13. Características del material habitual en el transporte de cargas por Renfe. (Elaboración a partir de las ilustraciones de www.listadotren.es y datos de www.renfe.es)

5 MODELO COMPUTACIONAL

En este capítulo se describe el modelo numérico propuesto para simular el comportamiento de la capa de balasto. La meta principal es que el modelo implementado facilite la obtención de información que generalmente no se puede conseguir con pruebas in situ o en laboratorio utilizando métodos tradicionales.

El modelo se fundamenta en el Método de Elementos Discretos, el cual representa una simplificación matemática de la realidad. El enfoque tiene en cuenta las fuerzas, momentos, velocidades y aceleraciones que afectan a cada partícula de manera individual en todo momento, lo que permite simular la conducta de un material granular a través de las interacciones entre ellas. Los programas de Métodos de Elementos Discretos no logran representar de manera efectiva la conducta de elementos continuos como los carriles, las traviesas o las sujeciones. Por esta razón, en el modelo numérico desarrollado solo se han incluido directamente las traviesas, ya que son esenciales para analizar la capa de balasto.

El desarrollo del modelo se lleva a cabo utilizando YADE, un software de código abierto, lo que implica adaptarse a las capacidades y restricciones del programa (Šmilauer et al., 2021). Este programa, desarrollado en lenguaje de programación C++, es un sistema que posibilita la creación de escenas muy similares a la realidad y la gestión de la simulación a través de Python.

En primer orden, se llevará a cabo un resumen de las principales características geométricas del modelo y de los componentes usados para representar las traviesas y la capa de balasto. Seguidamente, se exponen los supuestos iniciales en los que se fundamenta el modelo y se detalla el proceso llevado a cabo para lograr la geometría buscada. Por último, se detalla el procedimiento de aplicación de cargas que será implementado en la aplicación práctica del modelo.

5.1 Caracterización del modelo

5.1.1 Disposición geométrica

El motivo de la implementación del modelo es para analizar cómo se comporta el balasto en el tramo ferroviario de la Red de Interés General Española que conecta Valencia y Sagunto. Por eso, las dimensiones de la banqueta, la traviesa y la granulometría de la capa de balasto se han ajustado según las normativas de Adif y las condiciones específicas del tramo analizado. Anteriormente se mencionaron estas características en el subcapítulo de “Superestructura”, por lo tanto, en esta sección solo se detallarán las características del modelo implementado.

Una de las premisas en las que se basa el modelo es facilitar el estudio del comportamiento del balasto en un modelo de una traviesa en función de si los trenes circulan por ancho estándar o por ancho ibérico. Por lo tanto, el modelo se centra en la búsqueda de lo que se ha designado como “Elemento Fundamental”, el cual puede verse en la Ilustración 26. Se ha definido como Elemento Fundamental al conjunto formado por la capa de balasto y una traviesa de ancho mixto. Dado que en España el distanciamiento entre centros de traviesa es habitualmente de 60 cm, en la representación del Elemento Fundamental se ha representado la traviesa y a partir del centro de esta se han colocado 30 cm de capa de balasto a cada lado.

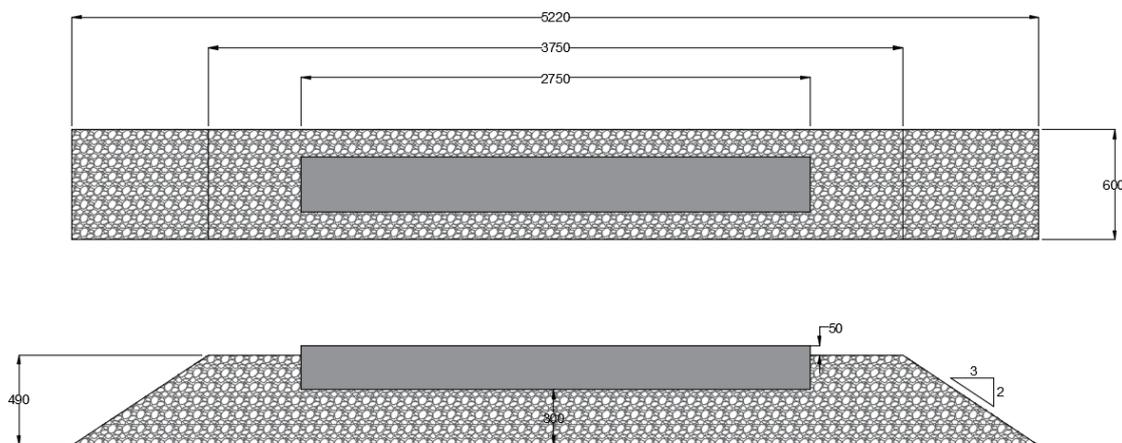


Ilustración 27. Representación geométrica del Elemento Fundamental del modelo. Vista en planta y vista en alzado, superior e inferior respectivamente. Unidades en milímetros. (Elaboración propia)

Como se ha mostrado anteriormente, el tramo entre Valencia y Sagunto se desarrolla en vía doble en su totalidad, a excepción de las estaciones y sus alrededores. Aunque en teoría la idea del “Elemento Fundamental” permite modelar una doble vía colocando las unidades en paralelo, el modelo se ha diseñado para una sola vía. Esto se debe a múltiples razones:

- En lo que respecta a las solicitaciones verticales, que son el foco principal de este estudio, se supone que cada vía se comporta de forma independiente debido a que el impacto de la vía adyacente es insignificante.
- Dado que una vía doble de ancho mixto presenta una simetría respecto a su eje central, exceptuando los carriles sobre la traviesa, el modelo de una sola vía debe presentar un comportamiento similar.
- En relación con el Método de Elementos Discretos, agregar más partículas al modelo afecta negativamente el rendimiento y los tiempos de computación. En este caso, el efecto se agrava si la inclusión de las distintas partículas no afecta de forma significativa en el comportamiento del modelo.

5.1.2 Capa de Balasto

La selección del tipo de representación de las piedras de balasto es un desafío clave en el desarrollo del modelo, ya que su impacto en el comportamiento total y en el tiempo de computación no debe subestimarse en absoluto. En esta situación se pretende encontrar un balance entre la fidelidad hallada en la realidad y la simplicidad, dado que el modelo propuesto implica una representación de la banqueta que incluye numerosas partículas, de la creación de que partículas demasiado complejas afectan negativamente el tiempo de computación del modelo.

Por esa razón, se ha decidido utilizar el método presentado en (Suhr & Six, 2020), en el cual se representa cada partícula de balasto como un conjunto de tres esferas con diferentes radios y solapamientos, tal como se ilustra en la Ilustración 28. La formación de un grupo de tres esferas es la forma más básica de conectar partículas y de limitar los movimientos en los tres ejes del espacio, lo cual es esencial para simular el balasto. La falta de complejidad evita comparar visualmente la forma de las partículas con una piedra real, por lo que en su lugar los autores prefirieron comparar los principales descriptores de la forma del balasto obtenidos de los cúmulos generados con trabajos anteriores sobre el balasto (Suhr et al., 2020).

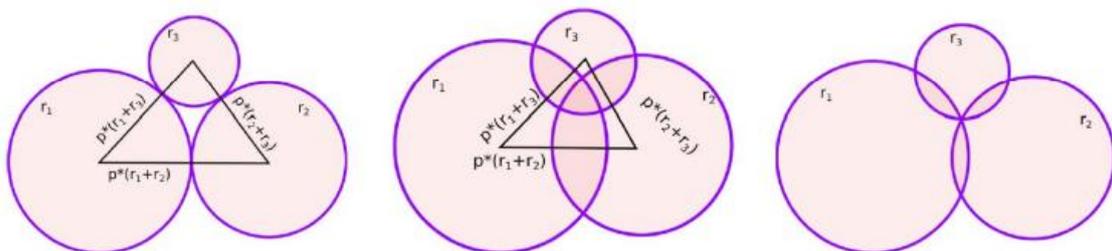


Ilustración 28. Muestra esquematizada de los tres tipos de cúmulos contemplados. Imagen de la izquierda, construcción de las esferas sin solape, imagen central, construcción con solape e imagen derecha, solape mínimo entre esferas. (Suhr & Six, 2020)

Los principales descriptores los cuales fueron analizados son: índice de lajas, f , elongación, e , esfericidad, ψ y el índice de convexidad, c . En las ecuaciones se representan por L , I , S , el eje más largo, medio y más corto, respectivamente, del mínimo paralelepípedo que rodea completamente el cúmulo. A su vez, A representa el área de la partícula y V su volumen (Véase Ecuaciones 2).

$$f = \frac{I}{L} \quad e = \frac{S}{I} \quad \psi = \frac{\sqrt[3]{(36 * \pi * V^2)}}{A} \quad c = \frac{V(\text{envolvente convexa})}{V_{\text{total}}}$$

Ecuaciones 2. Fórmulas para el cálculo de los principales descriptores del balasto.

En el estudio (Suhr & Six, 2020), se presentan tres grupos diferentes de cúmulos formados a partir de variaciones en la superposición entre partículas y en los tamaños relativos de los miembros del grupo, dando lugar a un total de 33 cúmulos únicos. Los autores eligieron 20 cúmulos de estas partículas que se ajustan adecuadamente a los descriptores propuestos, como se puede ver en la Ilustración 29. Estos 20 cúmulos serán utilizados en este estudio para modelar la capa de balasto en los correspondientes modelos.

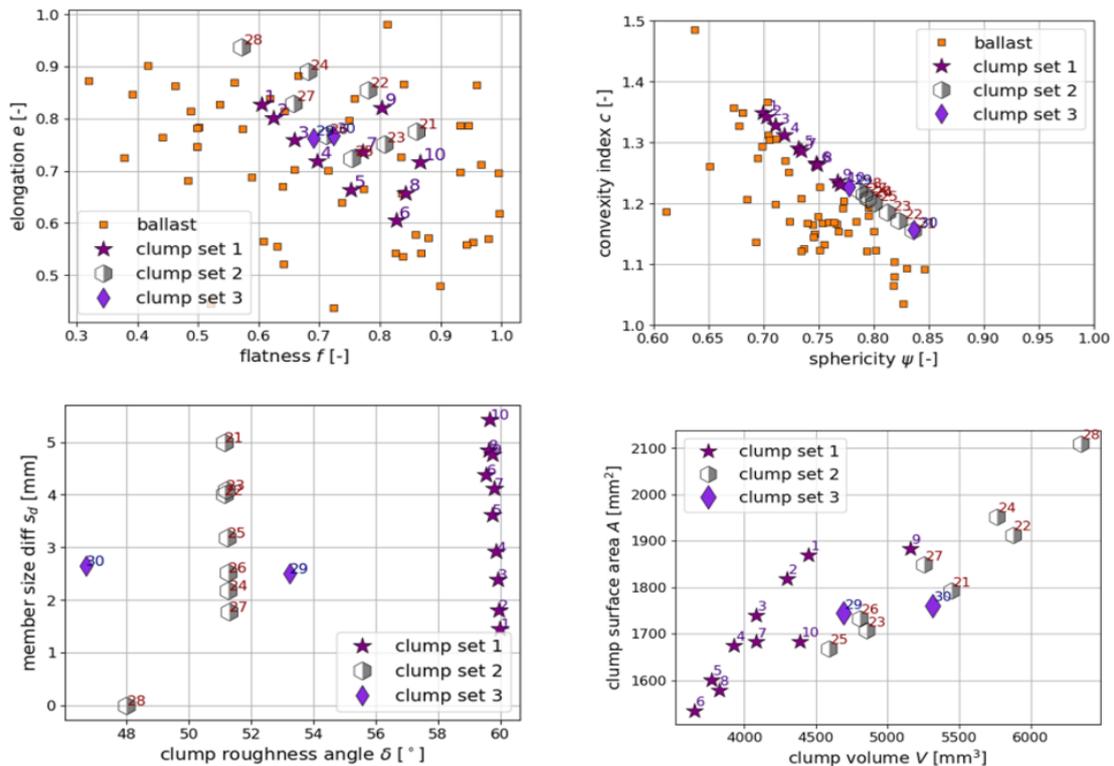


Ilustración 29. Comparativa de los principales descriptores de forma entre las partículas de balasto (amarillo) y los sets de cúmulos de cada una de las tres colecciones. (Suhr & Six, 2020)

La adopción de una granulometría adecuada es otro aspecto esencial al representar las partículas de balasto. Para este trabajo se ha optado por considerar el huso granulométrico aceptado por Adif para el balasto. A continuación, se muestra en la Tabla 14 la representación granulométrica empleada en el modelo siguiendo las especificaciones de Adif.

Granulometría del balasto en el modelo	
Tamaño del tamiz (mm)	% que pasa
63	100
50	99
40	65
31,5	25
22,4	0

Tabla 14. Datos granulométricos empleados en el balasto del modelo creado. (Elaboración propia con datos de Adif)

5.1.3 Traviesas

En el modelo numérico, las traviesas son necesarias para aplicar cargas en la banqueta de balasto y para validar el modelo se mide su descenso después de aplicarle cargas. Como se mencionó anteriormente, las traviesas en el tramo Valencia - Sagunto son del tipo AM - 05, por lo tanto, el modelo seguirá esa misma referencia para la traviesa implementada.

Es importante resaltar que el Método de Elementos Discretos tiene dificultades significativas al lidiar con materiales continuos como las traviesas. Por un lado, es imposible identificar cómo se distribuyen los esfuerzos dentro de la traviesa, mientras que, por el otro, el Método de Elementos Discretos asume que todas las partículas son completamente rígidas, evitando así cualquier tipo de deformación en la traviesa. A causa de estas restricciones, la traviesa se llevará a cabo de una forma simplificada en el modelo.

La travesía tiene la forma de un paralelepípedo con dimensiones de 2750 mm de largo, 300 mm de ancho y 240 mm de altura. La travesía está formada por tres paralelepípedos conocidos como cajas, unidos de manera rígida como los grupos de esferas que simbolizan el balasto. Todas las cajas tienen la misma anchura y altura, pero varía la longitud en función de en qué tipo de ancho nos encontremos y además dependiendo si la caja está en el centro de la traviesa o en los extremos. La Ilustración 30 muestra el diseño de la planta y del alzado de la traviesa, y también indica los puntos en los que se aplican las cargas. Cabe resaltar que, aunque se representen dos tamaños distintos de cajas esto no influye a la hora de la simulación ya que las cajas solo son utilizadas por el programa para saber dónde está el centro de esa caja y después aplicar la carga correspondiente.

La separación de la traviesa en tres cajas está determinada por las tensiones ejercidas por el paso de los trenes. El software utilizado solo admite la inclusión de fuerzas externas puntuales que se aplican en el centro de gravedad de los elementos. Por eso se ha dividido en

tres segmentos para poder analizar de manera separada la carga aplicada en cada carril y la ubicación en la que se aplica.

La razón detrás de dividir la traviesa en tres cajas unidas firmemente está condicionada por cómo se aplica la fuerza para simular el paso de los trenes. El programa utilizado solo permite la incorporación de fuerzas externas si son puntuales. Además, estos puntos de fuerza se ejercen en el centro de gravedad de los objetos. La medida de cada caja se ha elegido para que el centro de gravedad de las cajas extremas se alinee con el centro del patín del carril ya que es el punto donde de interacción entre el carril y la traviesa.

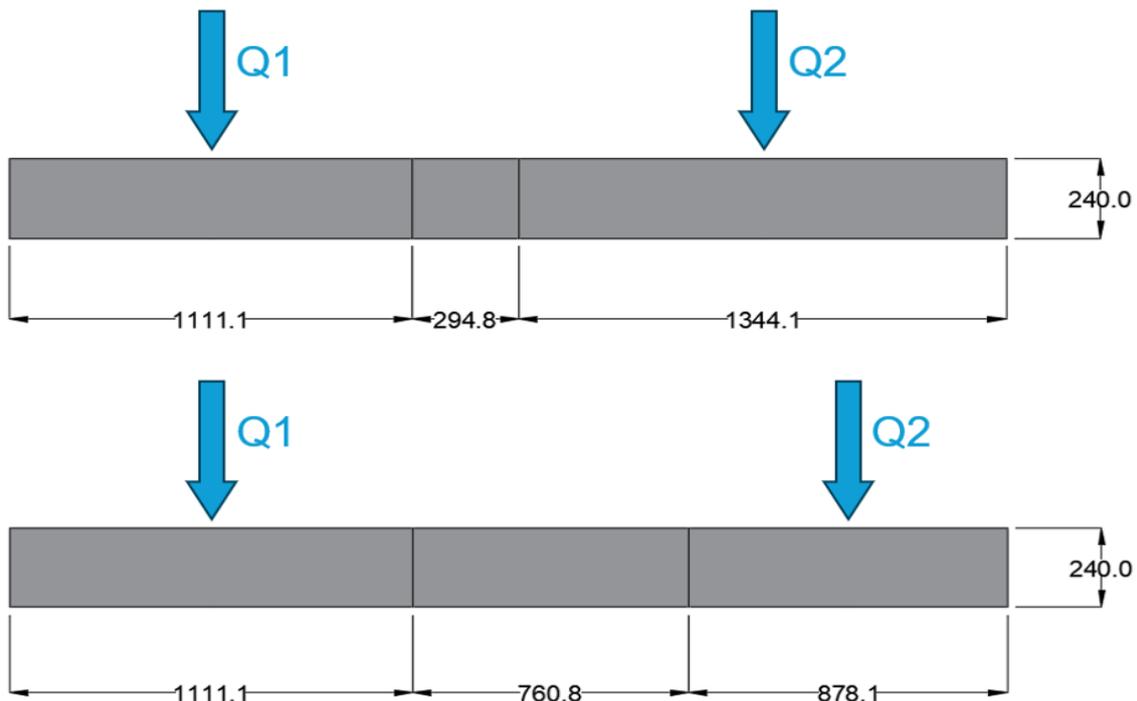


Ilustración 30. Representación del alzado del modelo de la traviesa en función del ancho de vía. Imagen superior vía de ancho estándar, imagen inferior vía de ancho ibérico. (Elaboración propia)

5.2 Premisas iniciales

5.2.1 Variables de la simulación

Dentro de esta clasificación se incluyen dos parámetros fundamentales en el Método de Elementos Discretos: el tiempo de cálculo y el amortiguamiento, conocidos comúnmente por sus nombres en inglés, timestep y damping. Aunque no sean conceptos físicos, estos parámetros están íntimamente relacionados con el resultado final del modelo, por lo tanto, su elección debe ser realizada con precaución.

El intervalo de cálculo es el período de tiempo entre cada iteración, o sea el lapso temporal entre cada cálculo de fuerzas y aceleraciones de las partículas. Un período de cálculo muy reducido afecta la velocidad de la computación, en cambio, un valor excesivamente alto puede resultar en la omisión de interacciones relevantes entre partículas, generando resultados no realistas. Por eso, hay un período de tiempo crítico que depende del tamaño, la masa y la rigidez de las partículas en la simulación. Se aconseja que el paso de tiempo en una simulación esté por debajo del intervalo crítico calculado para mantener su estabilidad, utilizando un factor de seguridad entre 0 y 1. Para este trabajo, se asume un coeficiente de seguridad de 0,5 que busca equilibrar la rapidez en los cálculos con la estabilidad de la simulación.

Además, el damping, conforme lo sugerido por Cundall y adaptado en (Šmilauer et al., 2021), es un amortiguamiento sin significado físico que afecta a las fuerzas y velocidades de las partículas del modelo para facilitar la transición a un estado de reposo. Para llevar a cabo simulaciones del comportamiento dinámico de partículas, como en este estudio, se aconseja utilizar valores muy pequeños, preferiblemente cercanos a cero. Por lo tanto, el modelo propuesto ha utilizado un coeficiente de amortiguamiento numérico de cero con el fin de obtener unos resultados los más fieles a la realidad posibles.

5.2.2 Patrón de contacto

El modo en que las diferentes partículas interactúan es determinado por el modelo de contacto, lo cual afecta directamente a los resultados finales proporcionados por el modelo. En este trabajo se utilizará una ley de rigidez no lineal de contacto, la simplificación de la ley de Hertz - Mindlin para resolver la falta de deslizamiento entre partículas. Este modelo de contacto utiliza la ley clásica de Hertz para los contactos normales y la simplificación de la ley tangencial de Mindlin asumiendo que no hay deslizamiento entre las partículas en contacto. Además, en el estudio de (Di Renzo & Di Maio, 2004) se observó que para modelos los cuales los parámetros elásticos no estuvieran bien definidos, como es el caso de modelos con formas esféricas, es aconsejable utilizar un modelo no lineal de contacto, como es el caso de este modelo.

5.2.3 Materiales

En los modelos de Elementos Discretos se requiere asignar un material a cada uno de los elementos que conforman el modelo. El tipo de material que se utiliza influye en las propiedades mecánicas que afectarán a la manera en que el elemento se comporta al interactuar con los demás componentes del modelo. Las propiedades mecánicas generalmente se relacionan con valores comunes en resistencia de materiales, como el ángulo de rozamiento interno el Módulo de Young.

El número de parámetros mecánicos que caracterizan un material está determinado por el tipo de material y el modelo de contacto seleccionado. Se destaca la importancia de reconocer que, al tratarse de una simplificación de la realidad, los valores de los parámetros utilizados pueden no ser exactamente valores iguales a los que este material tendría en la realidad. Para este proyecto, se ha seleccionado un conjunto de valores que ha sido utilizado para validar el modelo de comportamiento con los datos recopilados en campo.

En este capítulo se ha creado un modelo basado en el modelo de contacto Hertz – Mindlin simplificado y un material friccional sin cohesión. Se ha afirmado que este material es el más idóneo para simbolizar el balasto, una capa granular con partículas de tamaño grande y sin cohesión. Según esto, los parámetros que se requieren especificar para cada material incluyen: el módulo de Young, E , el ángulo de rozamiento interno, ϕ , la densidad, ρ , el coeficiente de Poisson, ν , los cuales se han introducido a continuación en el mismo orden en el cual aparecen en el código de la simulación.

En el diseño se incluyen tres variedades de materiales: el hormigón de las traviesas, el material que simula las partículas de la capa de balasto y un material de borde para los límites del modelo. Los valores de los parámetros de cada material, disponibles en la Tabla 15, se han asignado según la literatura (Ahmed et al., 2016; Irazábal González, 2017) con el fin de reflejar los resultados de los ensayos de campo.

HORMIGÓN	E (GPa)	30
	Φ (°)	31,5
	P (kg/m ³)	2500
	ν	0,3
BALASTO	E (GPa)	10
	Φ (°)	46
	P (kg/m ³)	2660
	ν	0,2
CONTORNO	E (GPa)	100
	Φ (°)	46
	P (kg/m ³)	2660
	ν	0,2

Tabla 15. Características mecánicas de los principales materiales utilizados para la creación del modelo.
(Elaboración propia)

5.2.4 Condiciones de contorno

Dado que no se puede simular la vía completa con el Método de Elementos Discretos, es preciso fijar restricciones en el modelo que no afecten demasiado a la simulación. A causa de las propiedades geométricas del modelo no es necesario establecer muchas condiciones de contorno para el propósito propuesto. En el modelo se han introducido dos tipos de restricciones las cuales se desarrollan a continuación.

- Los límites longitudinales del modelo determinan la cantidad de traviesas que lo componen y previenen la dispersión del balasto a lo largo, al mismo tiempo que le otorgan la rigidez necesaria en ese sentido. Por eso, estos límites se forman con planos verticales que son perpendiculares al eje de la vía, usando el mismo material que se usó para la base del modelo.
- El límite entre la capa de subbalasto y la capa de balasto, se ha definido como la base de sustentación del modelo. Este límite ha sido creado utilizando un plano con alta rigidez, tal como se describe en anteriormente, para reemplazar el subbalasto y las capas base de la infraestructura.

5.3 Proceso de preparación del modelo

La meta principal es lograr un modelo numérico que reproduzca la banqueta de balasto con las mismas características y forma deseada que se han mencionado anteriormente. Es necesario llevar a cabo ciertas etapas de preparación para poder aplicar cargas en el modelo y validar su aplicación práctica.

Estas fases, resumidas en la Ilustración 31, de preparación se llevan a cabo de forma progresiva. La definición de cada etapa se basa en tratar de hacerlas lo más parecidas posible al proceso real de colocar el balasto en la vía. Así, un cambio en el proceso de producción podría señalar los impactos de prácticas deficientes o dificultades en la construcción en la capacidad de carga de la vía ferroviaria.

Cabe destacar que al ser el principal objetivo la comparación del comportamiento de la capa de balasto en función de si el material rodante circula por ancho estándar o ancho ibérico, las propiedades, geometría y número de partículas del balasto son las mismas en el modelo de ancho estándar como en el modelo de ancho ibérico siendo así una comparación totalmente equitativa en ambos anchos.

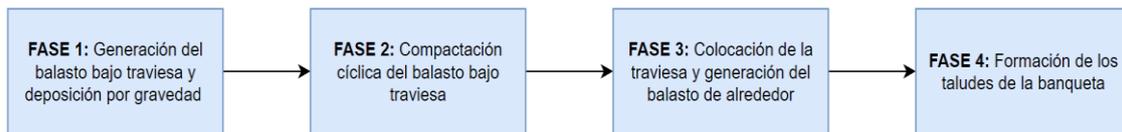


Ilustración 31. Fases de preparación para la generación del modelo. (Elaboración propia)

5.3.1 Fase 1: Generación y colocación del balasto

En la fase inicial de preparación se crean las partículas que coincidirán con el balasto debajo de la traviesa. Se forman agrupaciones de forma aleatoria en una caja de 600 mm x 4450 mm x 1500 mm para cada elemento del modelo lo cuales se definen como cúmulos, los cuales ya han sido mencionados en apartados anteriores. La generación al azar evita posibles influencias externas que podrían provocar un patrón regular en el comportamiento del balasto. En esta fase inicial se crean 21360 grupos por cada parte fundamental del modelo, resultando así un total de 64080 esferas.

Después de la creación aleatoria, comienzan varias repeticiones en las que las partículas son colocadas por la fuerza de gravedad dentro de ciertos límites que coinciden con las dimensiones de la caja donde fueron generadas, representadas por planos perpendiculares entre sí en el modelo. En esta fase no se permite que las partículas formen los taludes de la banqueta, a diferencia de lo que ocurre en la realidad, ya que se formarán en la última etapa por razones que se explicarán a continuación.

En este momento es apropiado explicar qué es la ratio de fuerzas desequilibradas según lo definido en (Šmilauer et al., 2021), la cual influye en la mayoría de las transiciones entre etapas de preparación. La relación se define como la suma de las fuerzas promedio en cada cuerpo dividida por la suma de las interacciones promedio entre cuerpos. En un estado de equilibrio estático perfecto, la suma de todas las fuerzas sobre los cuerpos es cero, lo que hace que la relación tienda a cero a medida que la simulación se estabiliza. Por eso se usa este criterio para definir cuándo una fase ha terminado y se puede continuar con la siguiente.

Para poder pasar a la siguiente etapa, es necesario que se cumplan dos condiciones al mismo tiempo para concluir que la deposición por gravedad ha terminado de manera correcta. Por un lado, la proporción de fuerzas desequilibradas debe ser menor que un umbral cercano a cero, considerando que no es posible llegar al cero debido a la precisión de los cálculos. Además, se fija un mínimo número de iteraciones desde el comienzo de la simulación, debido a que al principio la ratio de fuerzas desequilibradas es muy baja debido a la falta de interacciones entre las partículas.

5.3.2 Fase 2: Compactación cíclica

La muestra de balasto suelta y poco compacta, generada por la deposición gravitatoria de la etapa previa, no es capaz de resistir las fuerzas actuantes causadas por el tráfico ferroviario. Por tanto, durante esta fase se llevan a cabo varios ciclos de compactación con el fin de lograr una base de balasto densa, firme y capaz de resistir las cargas de los trenes sin que la capa de balasto sufra hundimientos excesivos.

Durante cada ciclo de compactación, una placa presiona hacia abajo la muestra de balasto a una velocidad constante. Cuando la fuerza ejercida sobre la placa alcanza un cierto nivel, se detiene la compresión y se levanta la placa hasta que la fuerza se neutraliza. Entonces, se comienza un nuevo ciclo de compactación en caso de que este fuese necesario. Es importante mencionar que la compactación se lleva a cabo conservando las partículas totalmente confinadas por las paredes entre las que quedaron atrapadas después de ser depositadas por gravedad. De este modo, la carga aplicada se utiliza completamente para compactar el balasto, impidiendo la dispersión lateral que ocurre cuando los bordes no están confinados.

El proceso de compactación de la muestra está determinado por completo por tres variables: la reacción máxima sobre la placa, F_n , el número de ciclos de compactación, N_{cyc} y la velocidad de descenso de la placa, v . Los valores utilizados en el modelo son los que se enumeran a continuación según han sido introducidos en el código para la simulación:

- Reacción máxima, $F_n = 50\,000\text{ N}$
- Número de ciclos de compactación, $N_{cyc} = 200$
- Velocidad de descenso, $v = 0,1\text{ m/s}$

En esta fase se busca simular el proceso de pasar un rodillo compactador sobre la capa inicial de balasto antes de colocar las traviesas, como pasaría en la colocación del balasto en la vida real. Aunque es verdad que la máquina no realiza tantos ciclos como en este ejemplo esto se debe a que en esta etapa se logra la misma consolidación que ocurre en la vida real al llevar a cabo tareas como el bateo y la estabilización dinámica de la vía, las cuales afectan significativamente la compactación del balasto. Por lo tanto, se decidió utilizar una solución simplificada donde se incluyen todas las operaciones de consolidación de manera conjunta. Con lo cual, el bateo y la estabilización dinámica no se han implementado en el modelo dado que es demasiado complejo de simular con un programa de simulación de métodos de elementos discretos y se ha optado por aumentar en número de ciclos de compactación.

5.3.3 Fase 3: Colocación de la traviesa y del balasto de alrededor

Después de terminar los procesos de compactación, se continúa con la instalación de la traviesa y el balasto que la rodea. Antes de comenzar esta etapa, se verifica que la capa de balasto formada en las operaciones previas tenga al menos 30 cm de espesor, en caso de que esto no se cumple se repiten los procesos anteriores hasta que esto se verifique.

La traviesa se coloca directamente encima de la capa de balasto y se deja asentar naturalmente por la fuerza de gravedad debido al peso propio de la misma. Las partículas de balasto se regeneran aleatoriamente en una caja sobre la traviesa, generando 11125 cúmulos por cada elemento fundamental, lo que resulta en un total de 33375 nuevas esferas. Estas partículas recién formadas deben caer por gravedad nuevamente hasta que la desigualdad de fuerzas alcanza un nivel suficiente para considerar que se ha logrado el equilibrio estático. En este momento se retiran las partículas ubicadas sobre la traviesa, dejando un espacio de 50 mm respecto a su parte superior para evitar que quede completamente sumergida en el balasto. No se repetirá la compactación en las nuevas partículas, ya que se cree que la resistencia de la vía no está relacionada con la compactación del balasto alrededor de la traviesa.

5.3.4 Fase 4: Formación de los taludes

En esta fase final, el modelo está compactados y con todos los elementos necesarios colocados para aplicar las cargas. Para que la representación sea lo más precisa posible al comportamiento real de la banqueta de balasto, se quitan las paredes que delimitaban lateralmente el balasto. Esto facilita que el balasto se desplace sin restricciones y se creen los taludes que definen los bordes de la capa de balasto. En este procedimiento se verifica si las pendientes obtenidas están dentro de los parámetros deseados.

En esta fase se vuelven a realizar las repeticiones hasta que la proporción de fuerzas desbalanceadas se acerca de manera razonable a cero. En ese instante, finaliza la preparación de la muestra de balasto y se inicia la aplicación de cargas.

5.4 Aplicación de las cargas

5.4.1 Distribución de la carga a las traviesas

La carga del eje de un tren no recae en una única traviesa, sino que se reparte a lo largo de varias traviesas a través del carril, siendo mayor en el punto donde se encuentra el eje y disminuyendo a medida que se aleja. Esto fue demostrado en (Koivisto et al.,2009) en el cual se observó que el reparto de cargas de un eje afectaba a 5 traviesas con reparto de cargas en el cual la traviesa que esta debajo del eje recibe un 50% de la carga, las dos traviesas adyacentes reciben

un 20% cada una y las traviesas exteriores un 5% cada una cómo se puede ver en la Ilustración 32.

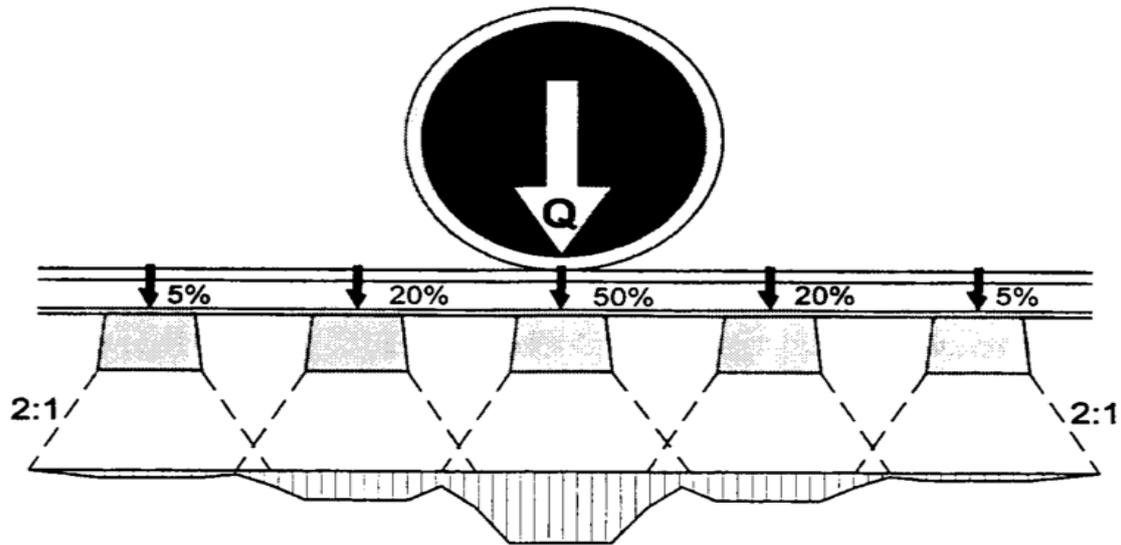


Ilustración 32. Reparto de una carga a lo largo de un emparrillado hacia la capa de balasto. (Koivisto et al., 2009)

Realmente no se sabe a ciencia cierta como se distribuyen las cargas en una vía ya que es muy complicado de medir al haber muchos factores en juego como saber si la rigidez debajo de cada traviesa es la misma o incluso como sería el reparto de cargas cuando el eje se encontrará entre medio de dos traviesas. Hay algunos autores como (Ramunas et al., 2014) que sugieren un reparto similar de cargas sobre cinco traviesas, pero variando los porcentajes de carga que recibe cada traviesa, afectando en un 40% a la traviesa central, un 25% a las traviesas adyacentes a esta y un 5% a cada una de las traviesas de los exteriores. Se cree que esta idea es la que mejor se asemeja al reparto de cargas real en un emparrillado, pero no se ha comprobado a ciencia cierta dada la dificultad de la comprobación con ensayos de campo. Además, otros estudios se centran en la idea de que la distribución de cargas en una vía no se centra a 5 traviesas, sino que realmente esta carga se extiende hasta afectar a 7 traviesas. Por lo tanto, como se ha comentado anteriormente no hay ningún estudio certero de cómo se distribuyen las cargas en una vía de manera exacta y a cuantas traviesas afecta.

De todos modos, para este estudio se ha optado por la peor de todas las posibles consecuencias, es decir, que la carga total del eje recaiga sobre una única traviesa, por lo tanto, la carga total del eje sería transmitida directamente a la traviesa sin ser necesario hacer ningún reparto de cargas. Por lo tanto, para el caso de carga estática, el caso de carga diferencial y el caso de carga cuasi - estática se realizará con el 100 % de la carga recayendo sobre una única traviesa. Se ha decidido hacer esto ya que el objetivo principal de este trabajo es ver el comportamiento de la capa de balasto en función de si el material rodante circula por ancho

estándar o por ancho ibérico, por lo tanto, mientras se aplique el mismo criterio para los dos tipos de ancho existentes los resultados obtenidos seguirán siendo correctos y al tener un mayor valor de carga sobre la traviesa se podrá observar mejor el comportamiento del balasto y los posibles defectos que se encuentren en dicha capa. Además, dado que el objetivo es observar los posibles defectos que puedan producirse, a los tres casos de carga anteriores se le ha simulado una carga de 22,5 t/eje lo cual correspondería con el paso de una locomotora de la Serie 252. Además, esta locomotora tiene la capacidad de circular tanto por ancho estándar como por ancho ibérico por lo tanto se ha tomado como referencia para hacer la comparativa en los tres casos de carga mencionados anteriormente.

5.4.2 Carga estática

La forma más sencilla de evaluar el comportamiento del balasto es aplicando una carga estática, aunque este método no refleja la realidad de manera precisa. Se realiza aplicando una fuerza Q en el centro de gravedad de las cajas ubicadas en los extremos de la traviesa, simulando la carga que transmitiría cada rueda del tren al carril y sucesivamente a la traviesa, como se indica en la Ilustración 30. La fórmula para calcular la carga Q_i en cada carril se obtiene a partir de la Ecuación 3. En esta ecuación, P representa la carga vertical por eje transmitida por el tren y R es el porcentaje de reparto según el tipo de traviesa que se analice. Como ya se ha comentado anteriormente, en este modelo para los tres primeros casos el valor de R es de 100.

$$Q_i = P * 0.5 * \frac{R}{100}$$

Ecuación 3. Fórmula para calcular la fuerza que se aplica sobre cada carril.

5.4.3 Carga diferencial

Otro de los posibles casos de carga que se pueden dar en una vía es que el reparto de cargas en una misma traviesa no sea igualitario, es decir, que un lado de la traviesa soporte más carga que el otro lado. Esto en vía puede ocurrir por diversos motivos como una falta de nivelación o incluso que en una de las zonas donde recae la carga del eje falte balasto produciéndose así una rotación de la traviesa en el eje longitudinal de esta lo que produciría que las cargas no se repartieran de manera equitativa.

Además, este factor se ve agravado en vías de ancho mixto en las cuales se utilizan traviesas AM-05. Este tipo de traviesas tiene la peculiaridad que es capaz albergar tres hilos, pero a su vez la traviesa no es simétrica, por tanto, si se junta una traviesa asimétrica con un balasto irregular la presencia de cargas diferenciales en la capa de balasto es bastante posible que ocurra.

5.4.4 Carga cuasi – estática

La carga que transmite a la vía un tren en movimiento no es estática ya que la velocidad, la condición de los coches o vagones y las imperfecciones en la vía causan que las cargas transmitidas sean superiores a las cargas teóricas estáticas. Por esta razón, se introduce la noción de la carga cuasi - estática, la cual establece que la carga que soporta un tren es igual a la carga estática multiplicada por un coeficiente de incremento, C_d , que toma en consideración la influencia de la velocidad y las imperfecciones en la vía.

En este ámbito hay diversos investigadores los cuales han aplicado diferentes criterios a lo largo del tiempo para calcular el valor del coeficiente α , pero en este estudio se utilizará el propuesto por Eisenmann en 1969 al tratarse de uno de los más expandidos a nivel mundial. De acuerdo con el escritor, el valor del coeficiente de mayoración dinámico, C_d , puede ser calculado utilizando la fórmula presentada en la Ecuación 4, la cual considera únicamente tres variables que serán descritas a continuación:

$$C_d = 1 + t * s * \varphi$$

Ecuación 4. Fórmula para calcular el coeficiente de mayoración dinámico.

donde:

t : es un factor de seguridad estadístico el cual sigue una distribución normal y es introducido para determinar la variabilidad de la carga. Este factor puede tomar valores de 1, 2 y 3 en función de la distribución de los valores medios. Para este caso se ha optado por tomar un valor de t igual a 3.

s : es el factor dependiente del estado de la infraestructura y que tiene en cuenta el mantenimiento al que se somete la vía. Este factor puede tomar valores de:

s : 0,1 para vías las cuales están en muy buen estado

s : 0,2 para vías las cuales están en buen estado

s : 0,3 para vías las cuales están en mal estado

Para el presente trabajo se ha optado por tomar un factor de seguridad s igual a 0,1.

φ : es el factor dependiente de la velocidad de circulación de la vía y se calcula como

$\varphi = 1$ para velocidades menores o iguales a 60 km/h

$\varphi = 1 + \frac{V-60}{140}$ para velocidades mayores a 60 km/h

Cabe destacar que estas fórmulas fueron desarrolladas hasta velocidades de 200 km/h ya que en 1969 había pocos trenes que pudiesen superar estas velocidades. Para velocidades

mayores a 200 km/h, lo cual hoy en día es bastante habitual, si se quieren utilizar las fórmulas de Eisenmann para calcular el coeficiente de mayoración dinámico es necesario recurrir a otra fórmula para calcular el factor dependiente de la velocidad de circulación el cual fue desarrollado en 1993.

$$\varphi = 1 + \frac{V-60}{380} \text{ para velocidades mayores a 200 km/h}$$

5.4.5 Carga dinámica

En todos los casos previos, las cargas consideradas en la traviesa no cambiaban con el tiempo, lo cual difiere bastante de la realidad en una vía ferroviaria, pero nos ayuda a recopilar información importante acerca de esta. En adición a estos ejemplos, se aplica una carga dinámica que cambia con el tiempo según las dimensiones y la velocidad del material rodante que transita por la vía.

Este trabajo considera dos opciones: la primera de estas es simular el paso de un solo eje por la vía y simular el paso de toda la Serie 447 que se utiliza en servicios de cercanías y la segunda opción es simular el paso de un solo eje por la vía y simular el paso de toda la Serie 130 la cual es considerado un tren de alta velocidad. Se ha considerado simular estos dos ya que el Serie 447 es el tren de cercanías más común en el tramo Valencia – Sagunto en la vía de ancho ibérico y el Serie 130 es uno de los trenes que más puede afectar a la vía de ancho estándar debido a la elevada velocidad de este. Cabe mencionar que si bien es cierto que en la vía no se puede circular a más de 160 km/h por normativa ya que no se han realizado pruebas en el caso de carga dinámica se simulara el paso del Serie 130 a una velocidad de 250 km/h ya que por características técnicas este puede circular a esta velocidad. También se ha decidido realizar esto ya que en un periodo corto de tiempo se prevé aumentar la velocidad del tramo por lo cual se adelanta el análisis de la vía y se pueden prever defectos antes de que se aumente la velocidad en el tramo.

Al igual que en los tres casos anteriores se realizó la comparativa aplicando el 100 % de la carga sobre la traviesa, en este caso de carga dinámica no se puede hacer esto ya que se está simulando la circulación del tren por la vía, por lo tanto, en función de la distancia que se encuentre el eje de la traviesa la carga que se aplicará sobre esta ira variando. Por lo tanto, usando una función a trozos, es posible aplicar una carga dinámica a la traviesa que cambia de manera constante según el tiempo y la velocidad de paso de los trenes.

Reparto de carga en función de la distancia del eje a la traviesa

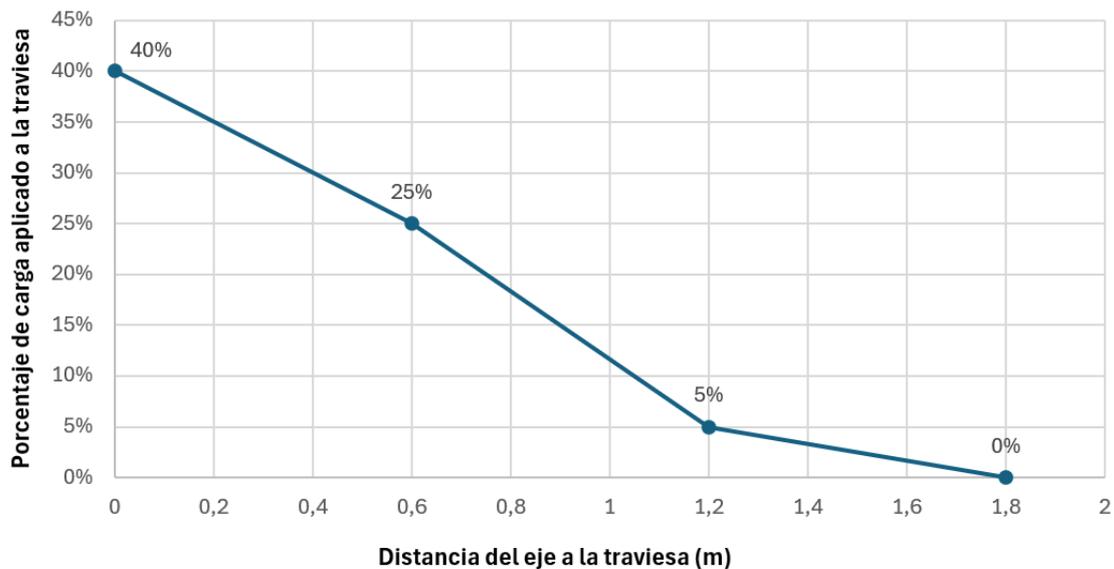


Ilustración 33. Gráfica representativa de la distribución de la carga de un eje de tren sobre una traviesa. (Elaboración propia)

Aplicar la carga distribuida en relación con la distancia del eje a la traviesa es adecuado para analizar un único eje del material rodante. Sin embargo, al simular el paso de una unidad entera de cualquier tren, la cercanía de los ejes en los bogies causa que las cargas transmitidas por diferentes ejes se solapen por lo cual es necesario considerar el efecto producido por el solape de las cargas. Para realizar esto se usarán las propiedades y geometrías descritas en el apartado 4.4 “Tipologías del tráfico”. Por lo tanto, para ver los posibles solapes se ha decidido realizar una distribución completa de las cargas de un tren de la Serie 447 y de la Serie 130 ya que son el que más veces circula por el tramo y el más veloz, respectivamente, lo cual hace que sean interesantes desde el punto de vista del análisis de la capa de balasto. También, existe una diferencia en el peso por eje, siendo más alto en los cabezas tractoras comparado con los ejes de los coches intermedios, ya que estos no son ejes de tracción.

A continuación, en la Ilustración 34 se representa la distribución de cargas de la composición seleccionada del tren Serie 447. Cabe destacar como se produce ese solape entre cargas de un mismo eje.

Distribución de cargas del tren Serie 447

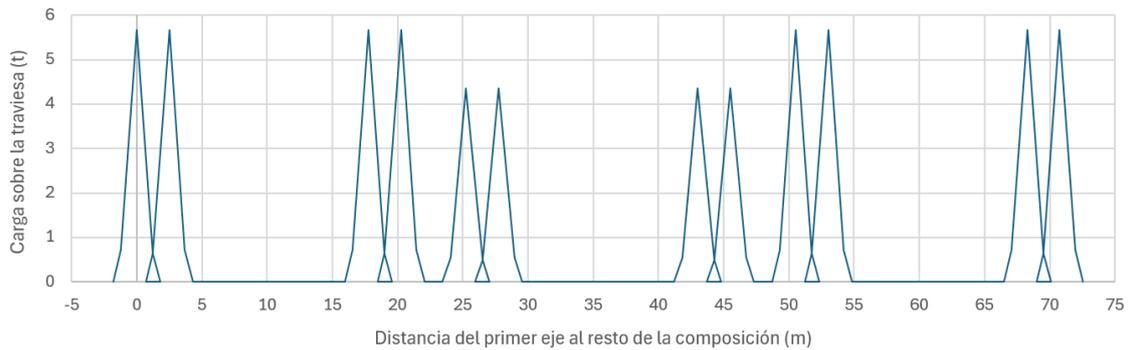


Ilustración 34. Gráfica representativa de la distribución de cargas sobre la traviesa producida por un Serie 447. (Elaboración propia)

Como se puede apreciar en la Ilustración anterior, el solape entre cargas solo se dará cuando la distancia entre ejes de un mismo bogie o ejes consecutivos de distintos bogies sea menor a 3,6 metros. Esto se debe a que, si se toma un modelo de 5 traviesas con una distancia entre traviesas de 0,6 metros, la distancia entre la primera y la última traviesa es de 3,6 metros. Por tanto, a distancias entre ejes mayores de ese valor nunca se va a producir un solape de carga. Debido a esto para el caso de la Serie 130 se ha optado por representar solo la cabeza tractora de la composición ya que las distancias entre el resto de los ejes son mayores a 3,6 y por tanto no se van a obtener ningún dato si se representa la composición completa.

Distribución de cargas de la cabeza motora del Serie 130



Ilustración 35. Gráfica representativa de la distribución de cargas sobre la traviesa producida por la cabeza motora de la Serie 130. (Elaboración propia)

Por último, es importante mencionar que la carga dinámica simulada se calcula multiplicando la carga estática por eje del tren por el factor de mayoración de Eisenmann, lo cual representa los efectos dinámicos verticales causados por la velocidad y las irregularidades en la vía. En las gráficas no se ha representado las cargas mayoradas por ese factor dinámico, se ha optado por representar las cargas sin mayoración. Todos los casos comenzarán con la primera

traviesa a una distancia de 2 m del primer eje del tren, lo que significa que se parte de una posición de reposo y sin afección por ninguna carga a la traviesa.

5.4.6 Carga lateral: STPT

El objetivo de los ensayos de carga lateral es determinar la resistencia lateral de la vía frente a las fuerzas externas. El método más comúnmente utilizado para estimar esta resistencia es el llamado STPT, Single Tie Push Test en inglés. Este ensayo se realiza desanclando la traviesa de las sujeciones y aplicando una fuerza lateral para medir el desplazamiento de esta. Este enfoque ha ganado popularidad sobre pruebas que aplican carga lateral a un grupo de traviesas debido a la simplicidad del equipo requerido, la facilidad para restablecer el estado inicial de la vía y la correlación positiva de los resultados con la vida real.

En el presente estudio este ensayo no se ha llevado a cabo debido a que el principal objetivo es ver el comportamiento de la capa de balasto en vías de ancho mixto en función de si el material rodante circula por ancho estándar o por ancho ibérico. Además, realizar este ensayo no proporcionaría resultados útiles para este estudio ya que el principal factor que se ve influenciado en el estudio es el tipo de traviesa, en este caso sería la AM-05, y al tratarse de una vía de tres carriles en donde la traviesa es la misma para los dos anchos, los resultados que se obtendrían si se realiza este ensayo darían igual para los dos tipos de ancho. Por lo consiguiente, se ha optado por no realizar este ensayo ahorrando así tiempo de computación.

6 APLICACIÓN PRÁCTICA AL TRAMO DE ESTUDIO

El presente capítulo tiene como objetivo aplicar el modelo de comportamiento desarrollado con anterioridad al tramo ferroviario entre Valencia y Sagunto, utilizando las cargas transmitidas por el material rodante que circula por la vía. Utilizando el Método de Elementos Discretos se puede investigar minuciosamente los impactos en la capa de balasto, algo que no es posible lograr muy difícil de lograr con la realización de ensayos de campo.

Para el análisis de las sollicitaciones actuantes ocasionados por el material rodante a la capa de balasto se ha optado por realizar un modelo el cual permita comparar la vía de ancho estándar con la vía de ancho ibérico.

6.1 Verificación

La validación del modelo ayuda a comprobar si las hipótesis y simplificaciones realizadas durante su desarrollo son apropiadas para representar de manera precisa el comportamiento real de la capa de balasto. En este estudio, se validará el modelo numérico creado comparando su rigidez frente a distintas cargas con los resultados de ensayos de campo en el tramo Valencia - Sagunto, cerca de la estación de Massalfassar como se detalló en el apartado 3.2.1 "Localización del tramo de estudio".

Las mediciones de tomadas mediante los ensayos de campo se realizaron en junio de 2019. Dichas mediciones se realizaron tanto en plena vía como en un desvío cercano. Cabe resaltar que para el presente estudio se utilizarán los datos obtenidos de la plena vía ya que es la mejor forma de corroborar que el comportamiento del balasto es parecido al que ocurriría en esta vía.

En la Tabla 16 se representan los valores de rigideces obtenidos a partir de las mediciones realizadas con los sensores potenciométricos. Dichos sensores capturan los descensos de la traviesa, pero no se sabe el tipo de tren que está circulando en dicho momento, por lo tanto, se decidió instalar una cámara que permita determinar el tipo de tren que está pasando en ese momento. Gracias a esto es posible saber el tren que circula y por tanto hacer una estimación de la carga que llevan ya que los trenes no siempre circulan con la carga máxima por eje. Cabe destacar que en el tramo comprendido entre Valencia y Sagunto la tipología del material rodante es muy diversa como ya se observó en el apartado 4.4 "Tipologías del tráfico". Por ello se ha optado por tomar los descensos del material móvil más característico en el tramo, ya se debido a su elevada frecuencia, la gran carga por eje que soporta o su elevada velocidad.

Como se puede observar en la Tabla 16 la rigidez vertical de la vía es bastante variable. Además, la rigidez influye mucho del estado de la vía y del lugar en el cual se tomen las mediciones ya que no toda la vía va a tener los mismos valores de rigidez ya que resulta casi imposible asegurar un valor de rigidez exacto para un tramo de vía. Por lo tanto, los valores de rigidez han de estar entre unos valores de magnitud lógicos y se establece un intervalo en el cual se pueden considerar aceptables. Por lo consiguiente, se considerará válido al modelo cuando los valores de rigidez se aproximen dentro de los órdenes de magnitud lógicos para una vía de estas características.

Material Móvil	Carga máxima por eje (kN)	Descenso (mm)	Rigidez Vertical (kN/mm)
Serie 447	141,8	0,989	143,38
Serie 130	180	1,333	135,04
Serie 253	225	2,122	106,04

Tabla 16. Valores de las rigideces obtenidos tras la medición de los descensos de traviesa en la vía en función del material rodante. (Elaboración propia)

A continuación, en la Tabla 17 se muestran las rigideces obtenidas para cada caso en función del ancho de vía, calculadas a partir del desplazamiento de la traviesa después de aplicar diferentes tipos de cargas. Para las cargas estáticas se ha tomado el descenso tras la estabilización del modelo, mientras que para las cargas dinámicas se ha medido el descenso inmediatamente al momento de aplicar la carga máxima. Como era de esperar al aumentar las cargas que las partículas soportan, se observa un aumento en las rigideces debido a que se ha definido un modelo de contacto no lineal entre partículas.

	SOLICITACIÓN	ANCHO	MAGNITUD (kN)	DESCENSO (mm)	RIGIDEZ VERTICAL (kN/mm)
CASO 1	Estática	Ibérico	225	1,60	140,62
	Estática	Estándar	225	1,66	135,54
CASO 2	Diferencial	Ibérico	225	1,60	140,62
	Diferencial	Estándar	225	1,65	136,37
CASO 3	Cuasi - estática	Ibérico	302,2	1,90	159,06
	Cuasi - estática	Estándar	302,2	1,96	154,19
	Cuasi - estática	Ibérico	340,8	2,01	169,55
	Cuasi - estática	Estándar	340,8	2,09	163,06
CASO 4	Dinámica (*)	Ibérico	202,6	0,86	235,58
	Dinámica (*)	Ibérico	202,6	0,85	238,35
	Dinámica (*)	Estándar	261	1,16	225
	Dinámica (*)	Estándar	261	1,12	233,04

Tabla 17. Valores de las rigideces en función del ancho de vía y el tipo de carga aplicada. (Elaboración propia)

(*) En el Caso 4 las casillas de ancho ibérico corresponden al eje simple y a la composición de la Serie 447, y las casillas de ancho estándar corresponden al eje y a la composición de la Serie 130, respectivamente.

Al comparar las rigideces medidas en el campo con las rigideces del modelo, se puede concluir que la aproximación es razonable y que los valores están dentro de un rango apropiado. Por todas las razones mencionadas anteriormente, se considera válido el modelo numérico desarrollado y se procede a obtener resultados que ilustren el comportamiento de la capa de balasto en el tramo entre Valencia y Sagunto.

6.2 Solicitación estática

6.2.1 Caracterización

Durante esta solicitud de carga se somete a la traviesa a una carga puramente estática la cual corresponde al peso por eje de un tren de mercancías de 22.5 toneladas por eje. Para poder comparar en mayor detalle las diferencias entre la circulación del material rodante en función de la vía se ha decidido aplicar dicha carga a ambas vías, aunque realmente en la vía de ancho estándar las cargas por eje son menores. Se ha decidido hacer esto con todas las solicitudes ya que si se aplican diferentes cargas a distintos anchos no es posible hacer la comparativa ya que la vía con mayor carga tendrá siempre los mayores defectos. Además, para ver agravados dichos efectos, se ha optado por no seguir la distribución de cargas en una vía y

aplicar directamente el peso por eje a una única traviesa. La razón por la cual se ha decidido hacer esto es para ver en mayor detalle los efectos que causaría y someter a la capa de balasto a condiciones límite.

En el transcurso de esta solicitud de carga se pueden identificar dos etapas claramente definidas: la primera implica aplicar carga a la traviesa, lo que provoca un descenso en la traviesa el cual será amortiguado por el balasto. La segunda fase ocurre después de disiparse la energía del impacto inicial, donde el modelo es estable y la traviesa ya no desciende, siendo este último el descenso considerado en solicitudes estáticas y cuasi - estáticas posteriores.

Por lo tanto, se ha optado por realizar un modelo, en el cual se simulará la carga transmitida tanto en una vía de ancho estándar como en una vía de ancho ibérico . Se ha decidido realizar únicamente un modelo con una traviesa para ambos anchos de vía ya que los tiempos de cálculo son más reducidos que en modelos de emparrillado de 3, 5 o incluso más traviesas. Además, el modelo de una única traviesa describe bastante bien la realidad de una vía y permite reducir drásticamente los tiempos de computación, exceptuando los posibles solapes de cargas que produzcan el resto de las traviesas.

6.2.2 Descenso de la traviesa

En la Ilustración 36 se observa la comparativa entre el descenso de la traviesa cuando el material rodante circula por ancho estándar (1435 mm) y el descenso cuando circula por ancho ibérico (1668 mm). Como es lógico en ambos casos se observa un descenso bastante progresivo de la traviesa hasta alcanzarse una estabilización de esta y un descenso estable a partir de los 130 ms.

Como era de esperar, el descenso producido en ambas traviesas es muy parecido, siendo de 1,6 mm para ancho ibérico frente a los 1,66 mm. Esto supone aproximadamente un 4 % el cual puede ser debido a múltiples factores como la aleatoriedad de la generación del balasto o incluso la zona de aplicación de las cargas ya que como se sabe en la vía de ancho mixto hay un carril común para los dos anchos, pero los otros dos carriles están separados por 233 mm por lo cual las cargas no están recayendo en el mismo sitio por lo tanto es lógico que los dos resultados no sean totalmente idénticos.

DESCENSO TRAVIESA ANCHO MIXTO

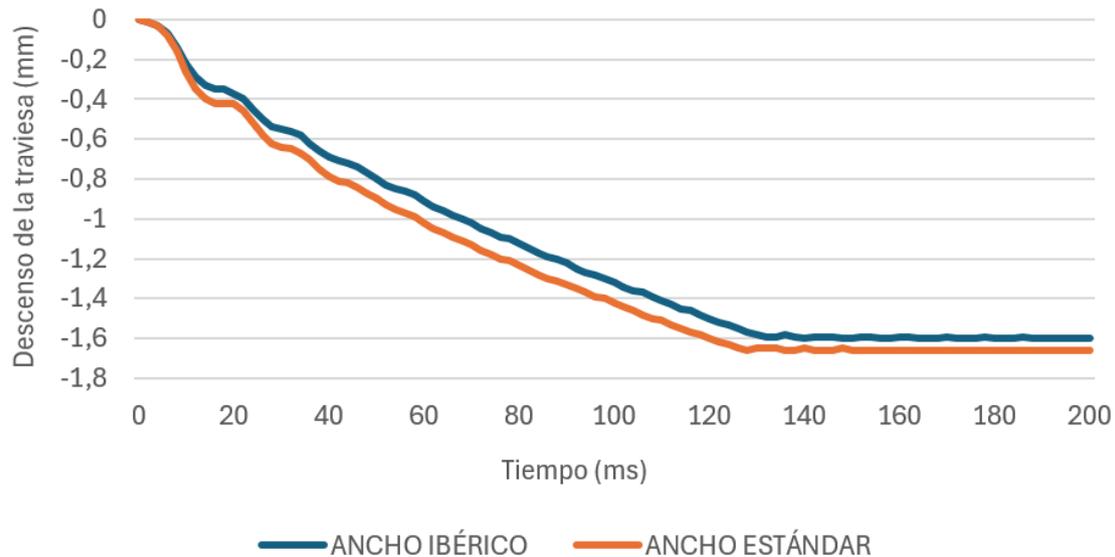


Ilustración 36. Gráfica comparativa entre el descenso de la traviesa en ancho ibérico y en ancho estándar.
(Elaboración propia)

6.2.3 Desplazamiento de las partículas de balasto

El desplazamiento de las piedras de la capa de balasto es una de las principales consecuencias ocasionadas por el paso de trenes sobre la vía produciendo además un descenso de las traviesas. A continuación, se analizarán los desplazamientos en la capa de balasto causados por una carga estática la cual simula la acción de una locomotora de la Serie 252.

Desplazamiento tridimensional

La Ilustración 37 proporciona información sobre la magnitud y la orientación de los movimientos de las partículas de balasto durante el proceso de estabilización del modelo. Gracias a este análisis se pueden conocer datos importantes acerca de cómo la capa de balasto absorbe los impactos. Se puede ver que, en un principio, la mayor parte del movimiento ocurre en la zona ubicada debajo de la traviesa. El movimiento de las piedras de balasto hace que el material de las hombreras se desplace hacia afuera, separándose de la vía y provocando una ligera elevación alrededor de la banqueta.

Además, si se comparan los dos anchos de vía en sus posiciones finales, es decir para un tiempo de 0,198 s se puede observar como la vía de ancho ibérico (Ilustración 7, tercera imagen) tiene un mejor reparto de cargas en la capa de balasto ya que todas las flechas debajo de la traviesa tienen una posición bastante ordenada y apuntan hacia abajo. Sin embargo, en la vía de ancho estándar (Ilustración 8, tercera imagen) se puede observar como en la zona de la caja

derecha se produce una especie de “espiral” debido a que esa zona el contacto entre la traviesa y la capa de balasto no está siendo homogéneo y algunas de esas piedras están ascendiendo.

A partir de la evaluación de estos factores, se puede deducir que la disminución de la estabilidad de la traviesa se debe principalmente al movimiento de las piedras de balasto hacia los costados, empujándolas fuera del área bajo la traviesa y causando el desplazamiento lateral y la expansión de la capa de balasto, lo cual podría justificar la presencia de una ligera deformación plástica entre diferentes cargas, además de la fractura de las partículas.

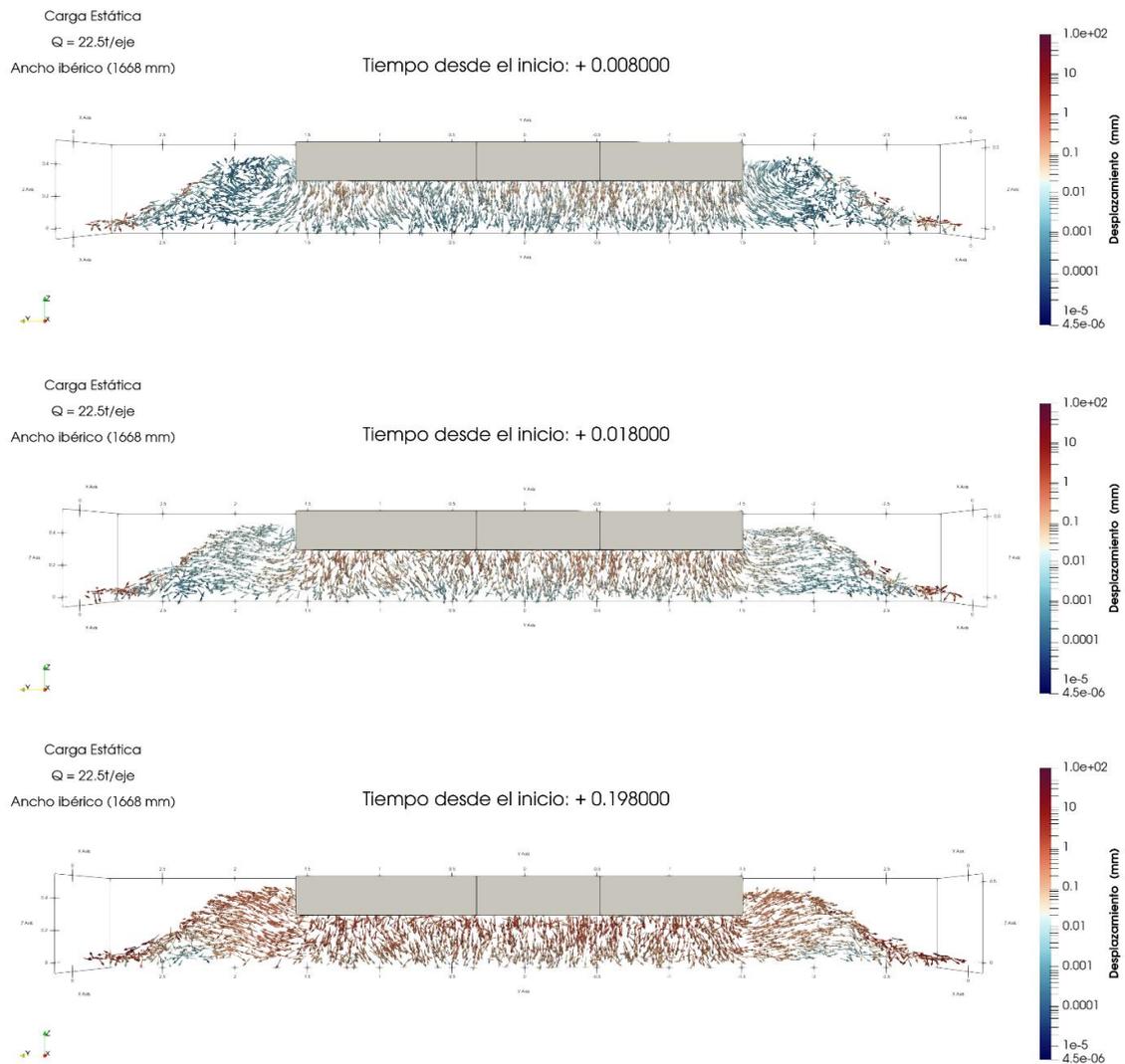


Ilustración 37. Proceso de evolución del desplazamiento tridimensional de las partículas de balasto en ancho ibérico. (Elaboración propia)

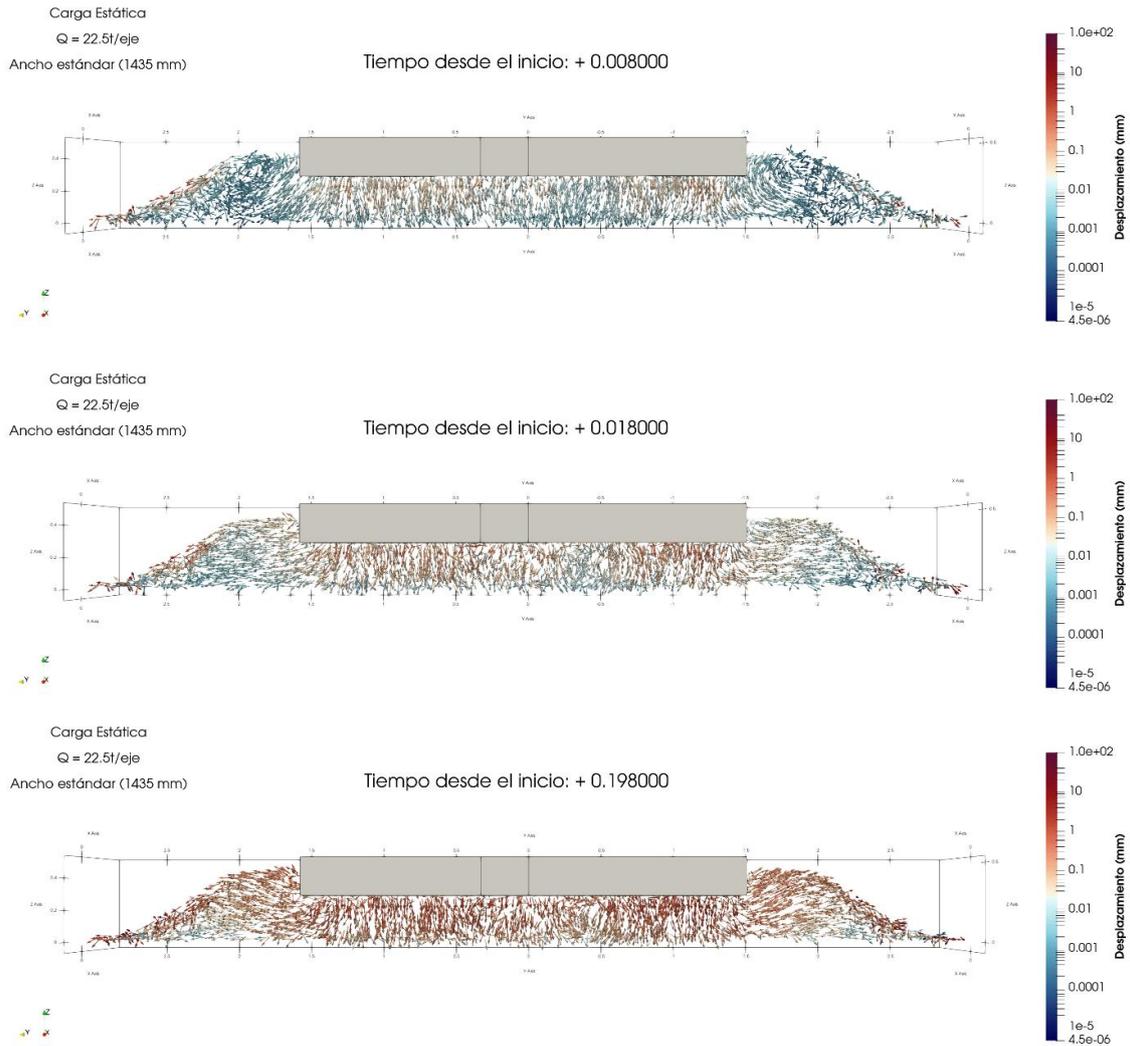


Ilustración 38. Evolución del desplazamiento tridimensional de las partículas de balasto en ancho estándar.
(Elaboración propia)

Desplazamiento vertical Eje Z

Si se procede a aislar el desplazamiento en el resto de las magnitudes y se permite únicamente a las partículas de balasto un desplazamiento en eje Z, es decir, puramente vertical se puede observar cómo, obviando el desplazamiento de las partículas sueltas en los taludes por el derrame de estas, la mayoría de las partículas han sufrido un desplazamiento bajo la zona en la cual estaría situada la traviesa. Además, al ver la vista en planta, se nota la zona de apoyo de la traviesa debido al intenso color azul de las partículas. Se destaca que las partículas no descienden de manera totalmente uniforme bajo la traviesa, sino que hay ciertas variaciones debido a la superficie irregular de la banqueta y el contacto desigual con la traviesa.

Por otra parte, se puede apreciar en la imagen inferior de la Ilustración 39 como se produce una zona en donde no hay casi coloración azul, debido a lo mencionado anteriormente. En esa zona el balasto no está descendiendo debido a la especie de “espiral” que se forma. Esto es debido a que el balasto es un material discontinuo y el contacto entre la traviesa y el balasto no se produce de manera totalmente homogénea en toda la traviesa.

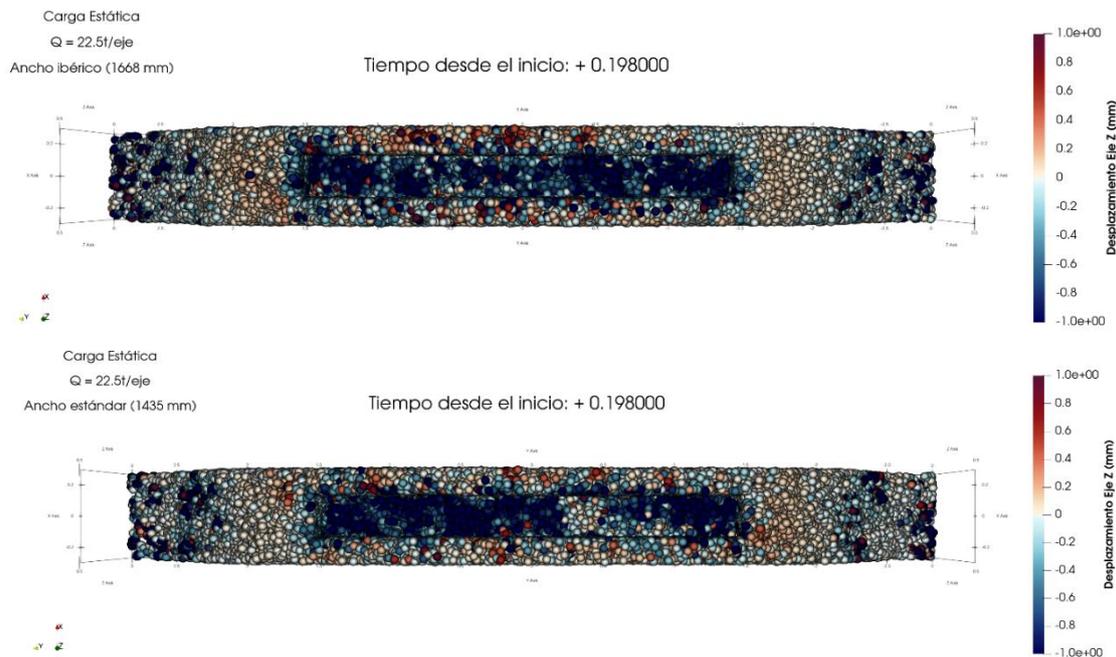


Ilustración 39. Vista en planta del desplazamiento vertical de las partículas de balasto. Comparativa entre ancho ibérico (superior) frente al ancho estándar (inferior). (Elaboración propia)

Además, si se realiza un corte transversal a la sección de la capa de balasto se puede apreciar aún más como descienden estas partículas de balasto. A rasgos generales podemos apreciar en ambos anchos (ancho estándar y ancho ibérico) una disminución en el valor del descenso de las partículas el cual se reduce gradualmente hasta llegar a las partículas en la parte inferior que permanecen estables en posición vertical y no pueden descender.

Se puede observar en la imagen superior de la Ilustración 40 como en la vía de ancho ibérico el reparto de la carga es más homogéneo ya que la mayoría de las piedras de debajo de la traviesa descienden, produciéndose así un asiento de la traviesa de manera equitativa. Sin embargo, en la imagen inferior, correspondiente a la vía de ancho estándar, el desplazamiento de las piedras de balasto se concentra más en algunas zonas y en otras no hay casi desplazamiento (efecto de la espiral visto anteriormente).

Otra de las diferencias que se aprecian a simple vista es que el balasto de las hombreras de la vía de ancho ibérico sufre un mayor empuje vertical debido al desplazamiento del balasto de debajo de la traviesa, lo cual se ve reflejado en unas zonas de mayor coloración rojiza en las hombreras. Esto es debido a que las partículas que hay debajo de los extremos de la traviesa están empujando a las piedras de las hombreras produciendo así esa elevación ascendente y el hinchamiento.

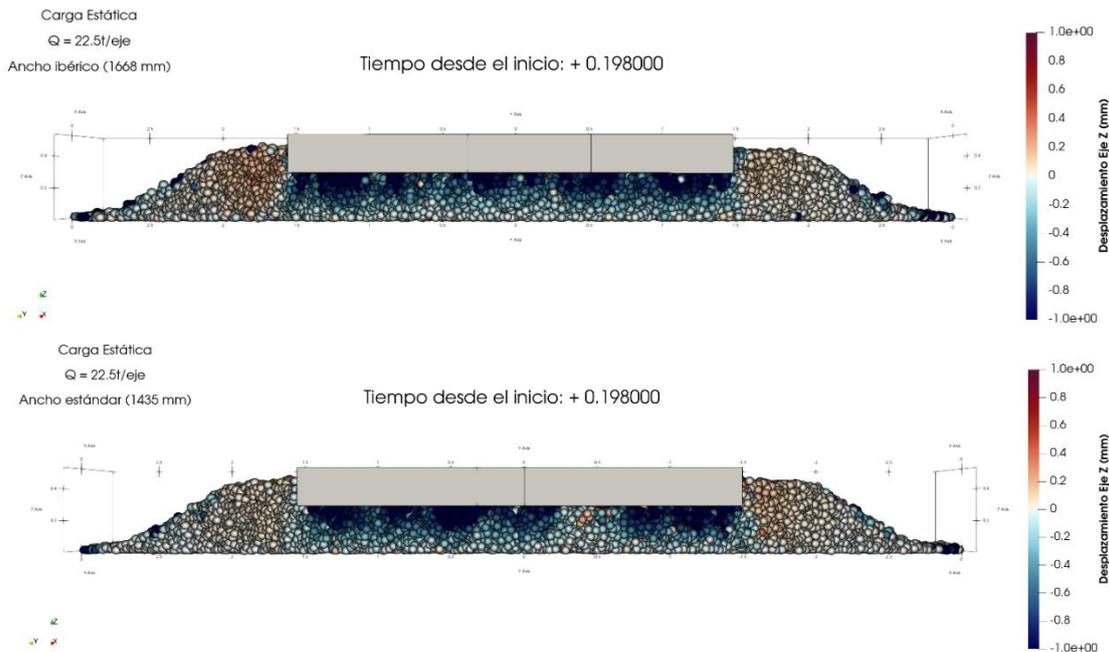


Ilustración 40. Vista en alzado del desplazamiento vertical de las partículas de balasto. Comparativa entre ancho ibérico (superior) y ancho estándar (inferior). (Elaboración propia)

A continuación, se ha optado por realizar un corte perpendicular a las traviesas por el centro de estas, es decir, se ha hecho un corte longitudinal al eje de la vía para poder observar realmente que pasa en la capa de balasto justo en el centro de la traviesa, obteniendo así un mayor grado de detalle. Además, como se aprecia en la Ilustración 41, se ha decidido no representar, la traviesa para que se pueda apreciar mejor el desplazamiento del balasto de alrededor de esta.

Tal y como ya se ha mencionado anteriormente, con este corte se puede reafirmar lo visto en las ilustraciones anteriores. En la imagen superior, correspondiente al ancho ibérico se puede observar cómo las partículas de balasto debajo de la traviesa sufren un desplazamiento menor que el comparado con el de ancho estándar, el cual genera desplazamiento de las partículas a mayor profundidad. Esta diferencia se debe a que en la vía de ancho ibérico se produce un mejor reparto de cargas que en la estándar, y por esto en la de ancho estándar se puede apreciar cómo las partículas de balasto que están más profundas también se están desplazando.

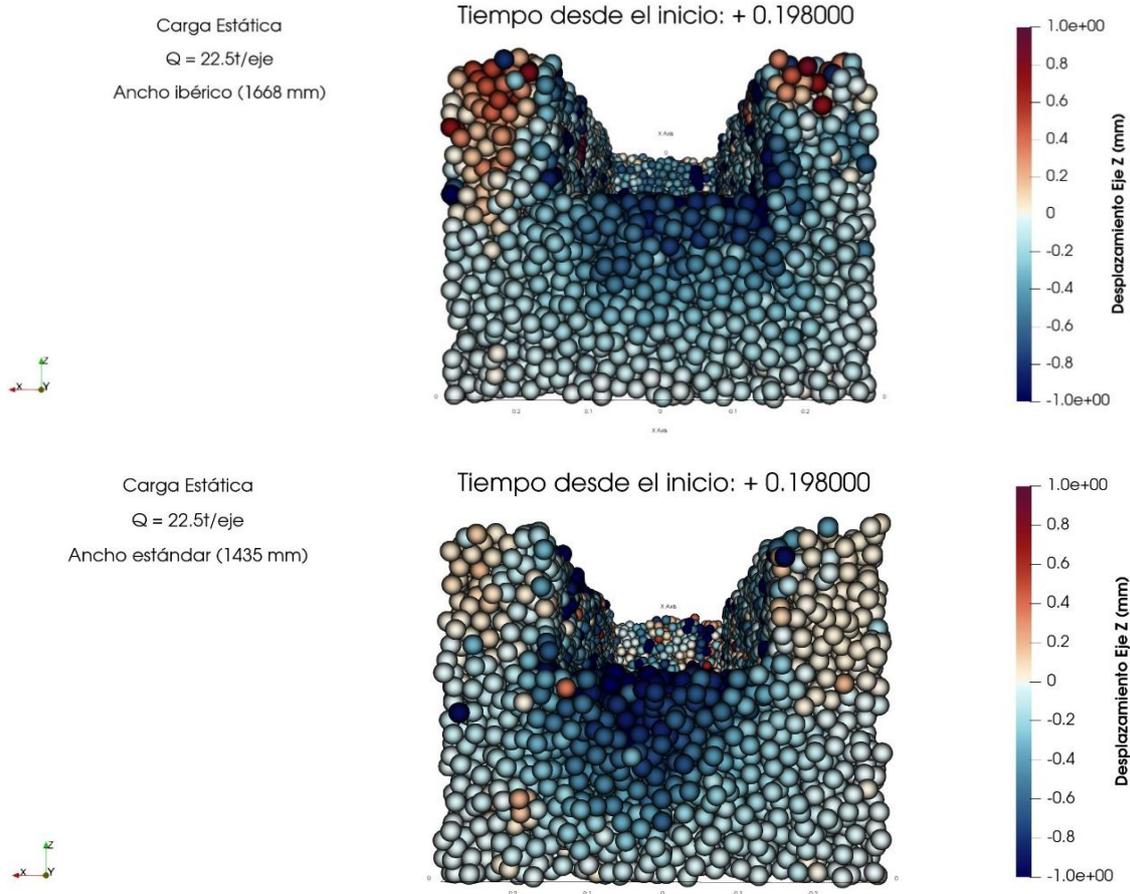


Ilustración 41. Corte longitudinal por el centro de la capa de balasto. Comparación de los desplazamientos verticales entre ancho ibérico (arriba) y ancho estándar (abajo). (Elaboración propia)

Desplazamiento horizontal Eje Y

La otra componente principal de los desplazamientos de las partículas es el desplazamiento en el eje transversal de la vía. Obviando nuevamente los desplazamientos de las partículas que se desprenden en la superficie del talud debido al derrame, se observa que los mayores desplazamientos transversales se producen en las zonas extremas de la traviesa. Estos desplazamientos son especialmente significativos en estas áreas debido a la forma en que la estructura de la traviesa interactúa con las fuerzas externas, provocando un movimiento más pronunciado en comparación con otras partes de la vía.

Para esta representación se ha decidido no incluir la traviesa para observar mejor el comportamiento del balasto debajo de esta. En este caso, se ha elegido representar de color rojo los desplazamientos hacia la izquierda y en azul los desplazamientos hacia la derecha. Como se puede ver en la Ilustración 42 en la imagen superior, correspondiente a la vía de ancho ibérico, se observa cómo el balasto de los hombros sufre un desplazamiento hacia el exterior debido a los empujes que ejerce el balasto de sus proximidades. Sin embargo, en la vía de ancho estándar, la

magnitud de este empuje es menor, ya que hay menos coloración roja y azul en los hombros. Esto se debe a que la mayoría del balasto en la vía de ancho estándar desciende de manera vertical y la componente horizontal no es muy significativa.

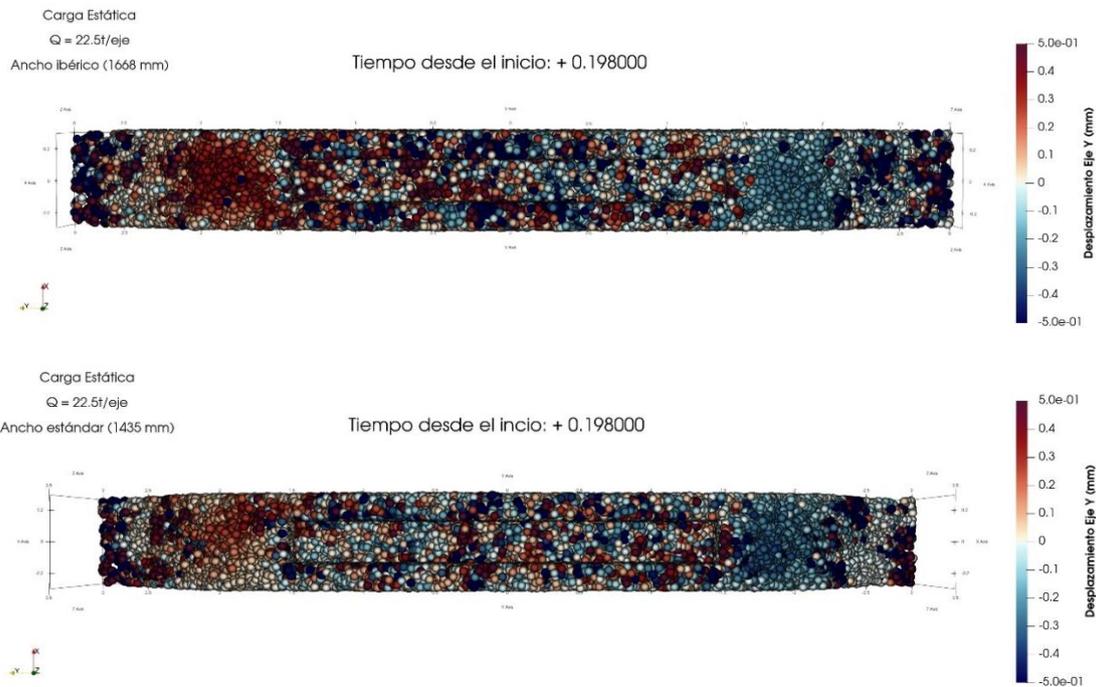
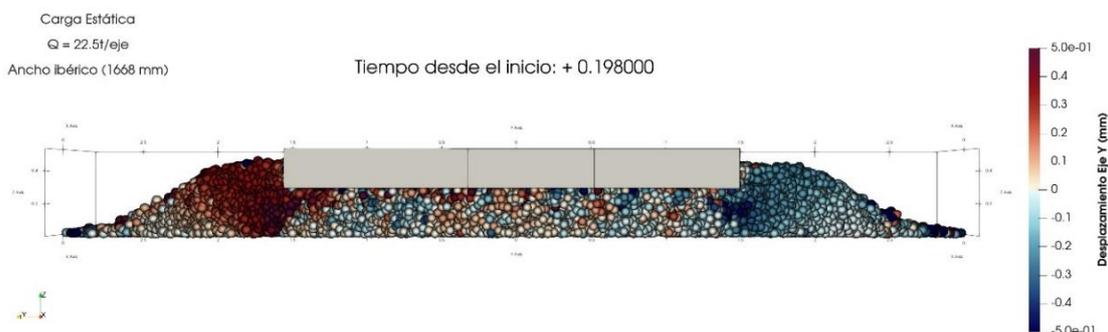


Ilustración 42. Vista en planta de la comparativa del desplazamiento horizontal del balasto entre ambos anchos. (Elaboración propia)

A continuación, se ha procedido a realizar un corte por la mitad de la capa de balasto para ver una vista en alzado. Como se observa en la Ilustración 43, al tratarse de un desplazamiento en horizontal las partículas de balasto de debajo de la traviesa no sufren casi desplazamiento al estar estas sometidas en su mayoría a una carga vertical. Si observamos las hombreras es donde se puede observar que el balasto se desplaza hacia los exteriores. Tal y como se ha comentado anteriormente en la vía de ancho ibérico el desplazamiento del balasto en las hombreras horizontal esta más acentuado que en vía de ancho estándar.



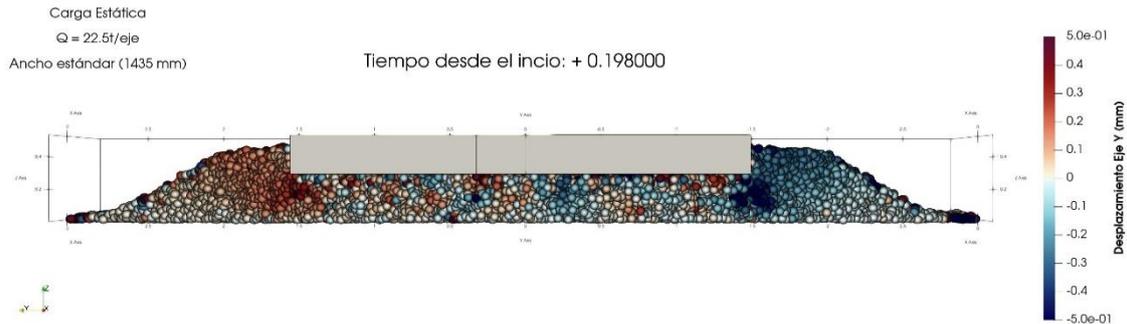
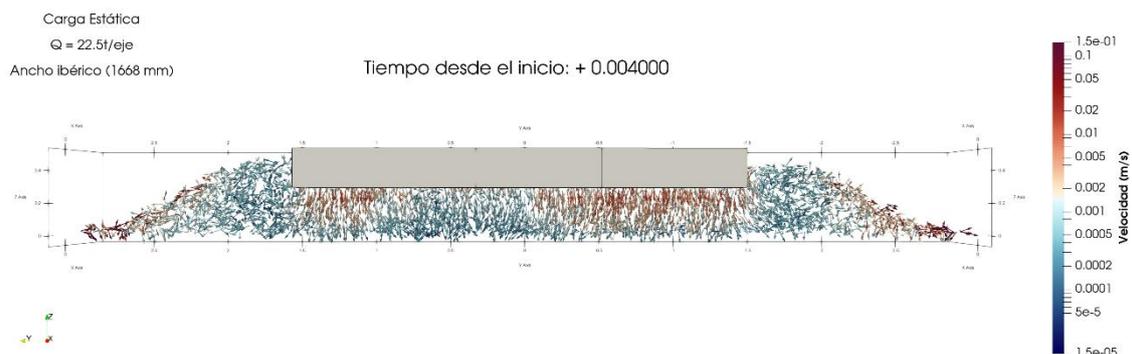


Ilustración 43. Vista en alzado de la comparativa del desplazamiento horizontal del balasto entre ambos anchos.
(Elaboración propia)

6.2.4 Velocidad de las partículas de balasto

En el análisis del balasto, las velocidades de las partículas después de estabilizarse no son importantes en una solicitud estática. No obstante, es posible analizar las velocidades que afectan a las partículas de balasto desde el inicio de la carga hasta que se estabilizan. De manera similar a lo que sucede con los desplazamientos, se puede observar que las primeras partículas en alcanzar una velocidad significativa son las que se encuentran justo debajo de la traviesa. Inmediatamente después, estas partículas impulsan el movimiento del balasto ubicado en la zona de las hombreras. Así, se genera un gradiente de velocidad hacia el exterior de la banqueta. En la Ilustración 44 y 45 se representa una serie de los momentos más significativo del movimiento de estas partículas, es decir, se representa los momentos en donde la velocidad de las partículas tiene un valor relevante de cara al análisis.

La velocidad de las partículas está ligada directamente con el desplazamiento de estas, por lo tanto, como se puede observar en la vía de ancho estándar se produce la misma espiral que ocurriría con los desplazamientos y por lo tanto estas partículas tienen una menor velocidad ya que el desplazamiento en estas también es menor. Además, se vuelve a observar el mejor reparto en la carga en la vía de ancho ibérico ya que la mayoría de las partículas debajo de la traviesa se mueven a la misma velocidad. También, se observa que ambos anchos presentan velocidades similares en las partículas de balasto los cuales son cercanos a 0,15 m/s.



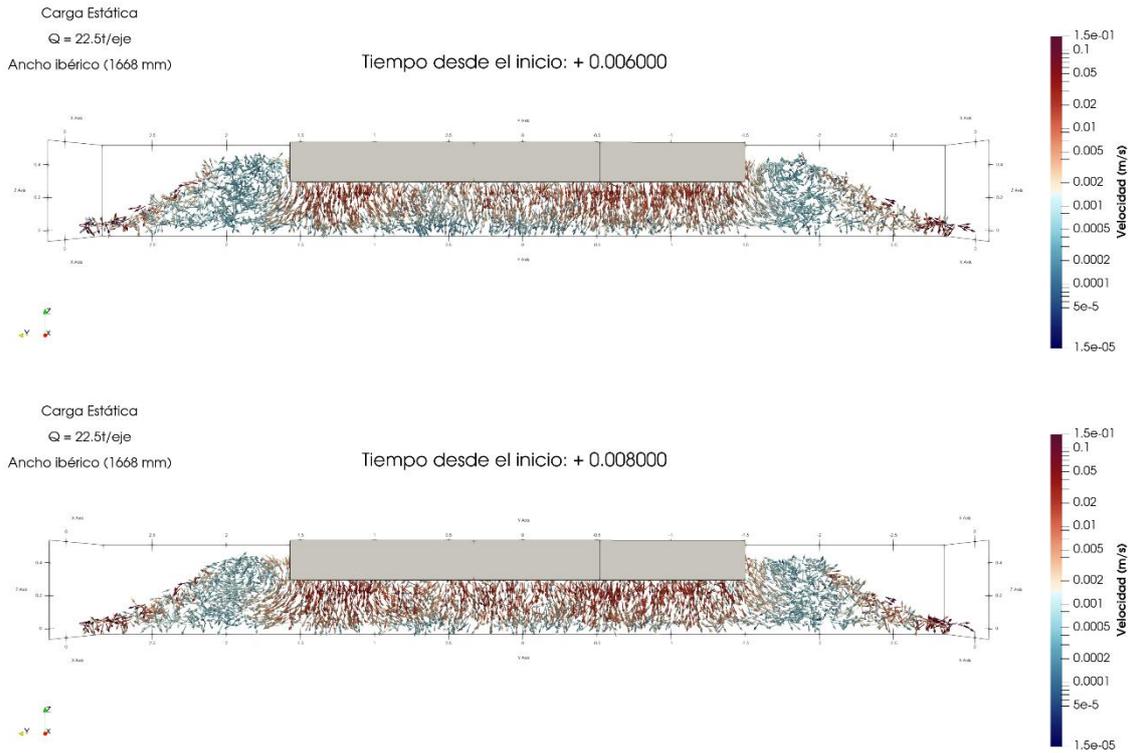
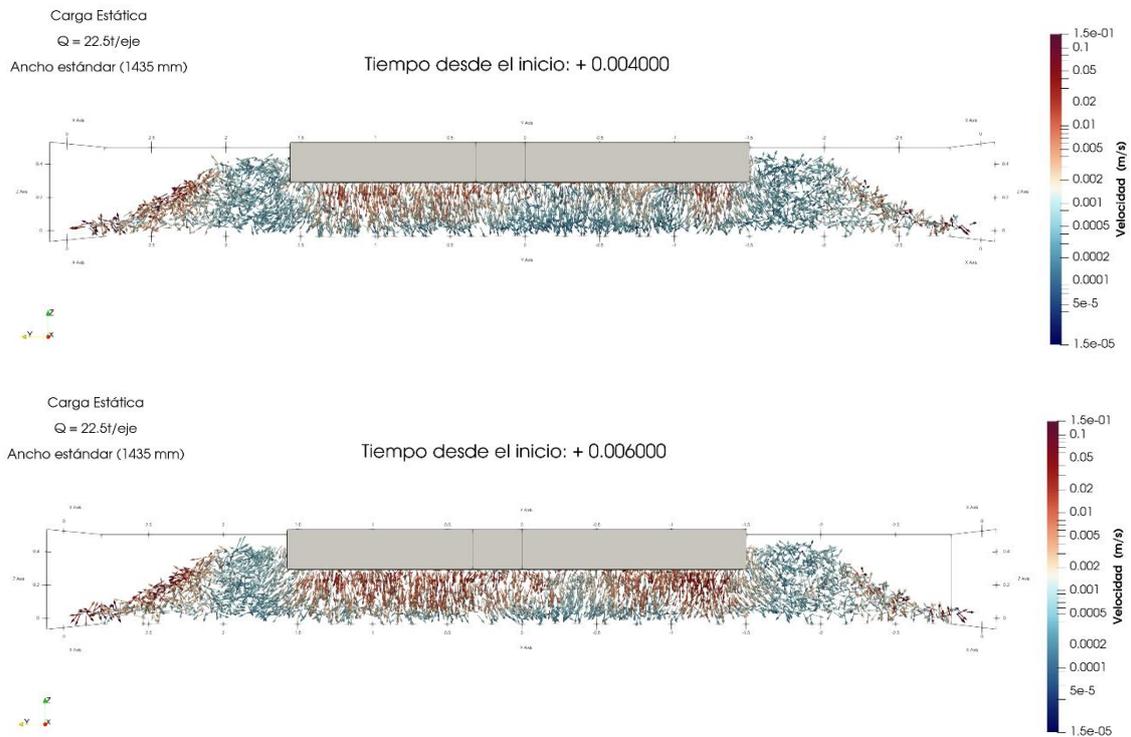


Ilustración 44. Velocidades de las partículas de balasto en ancho ibérico en los primeros instantes de aplicación de la carga. (Elaboración propia)



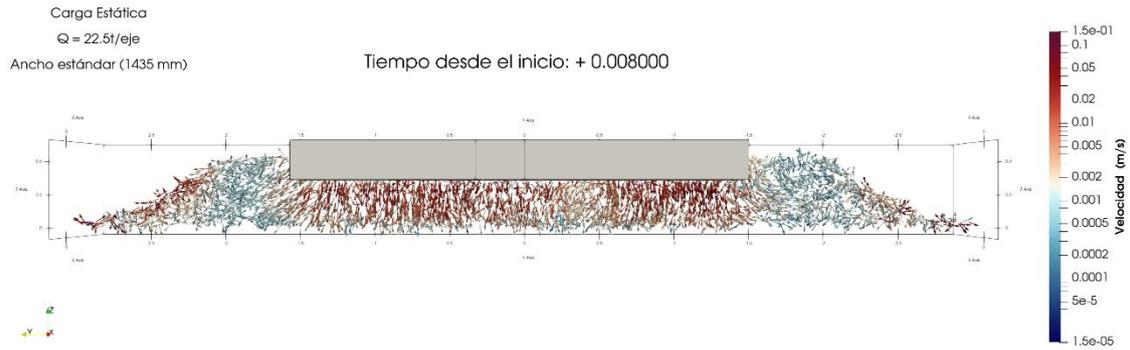
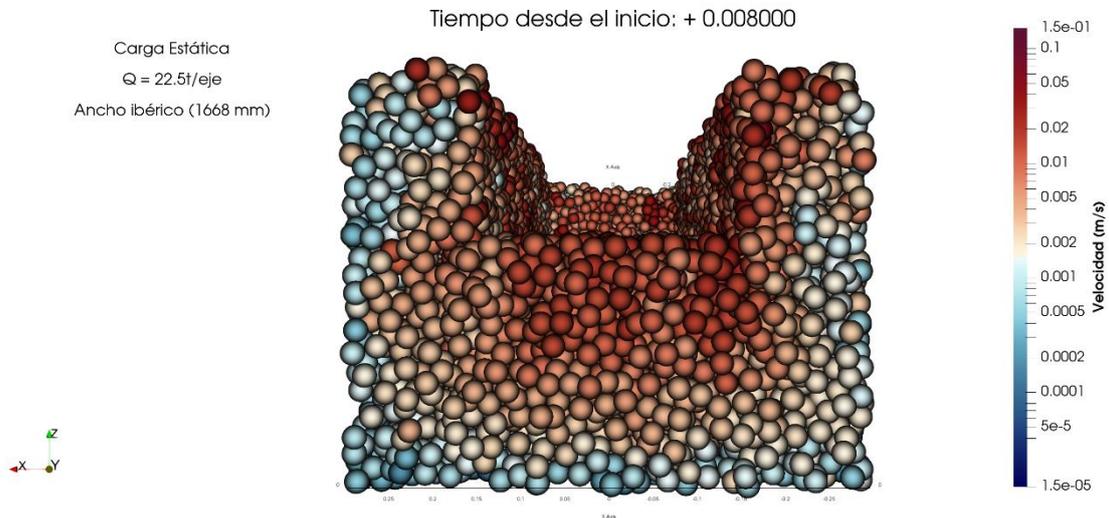


Ilustración 45. Velocidades de las partículas de balasto en ancho estándar en los primeros instantes de aplicación de la carga. (Elaboración propia)

A continuación, se procede a mostrar una vista de una sección transversal en la cual se ha realizado el corte por la zona del centro de la capa de balasto para poder observar las velocidades de las partículas. Se ha decidido realizar el corte en un tiempo inicial ya que es donde mejor se aprecian dichas velocidades. Como se puede observar en la Ilustración 46, en la imagen superior, la cual representa a la vía de ancho ibérico, se puede observar que únicamente adquieren velocidad las partículas más superficiales bajo la zona de la traviesa, mientras que en la vía de ancho estándar casi todas las partículas bajo la traviesa adquieren velocidades significativas.



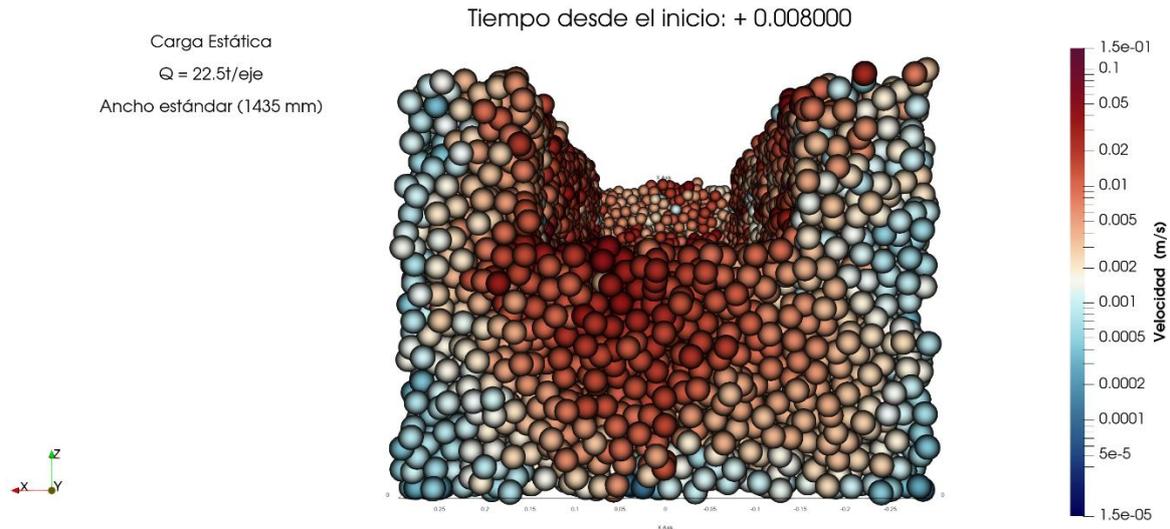


Ilustración 46. Representación de un corte longitudinal al balasto por el centro de la capa. Comparativa de las velocidades de las partículas entre ambos anchos de vía. (Elaboración propia)

6.2.5 Cadena de fuerzas en la capa de balasto

Las cadenas de fuerza permiten mostrar detalladamente cómo se distribuye la fuerza normal entre las piedras de balasto a lo largo del espesor de la banqueta. Esta visualización es fundamental, ya que nos proporciona una comprensión precisa y realista de cómo se transmiten las cargas en el balasto. Al conocer esta distribución de fuerzas, se pueden tomar decisiones informadas para mejorar la durabilidad y eficiencia de las estructuras ferroviarias, asegurando así un rendimiento óptimo y prolongado del sistema de vías.

A continuación, en la Ilustración 47 se representan las cadenas de fuerzas para el momento en el que el descenso se encuentra estabilizado. Como se puede observar en la vía de ancho ibérico, hay una zona central en la traviesa en la cual la cadena de fuerzas no llega a tocar la capa de subbalasto. Esto se debe a que en la vía de ancho ibérico se distribuyen mejor las cargas por la capa superficial del balasto, por lo tanto, las cadenas de fuerza son más superficiales. Sin embargo, en la vía de ancho estándar, casi todas las cadenas de fuerzas tocan la capa de subbalasto exceptuando una zona, la cual coincide con la zona de la espiral en la representación de los desplazamientos. Como ya se ha comentado anteriormente, en esta zona el contacto de la traviesa con el balasto es inferior, por lo cual las cadenas de fuerzas son menores.

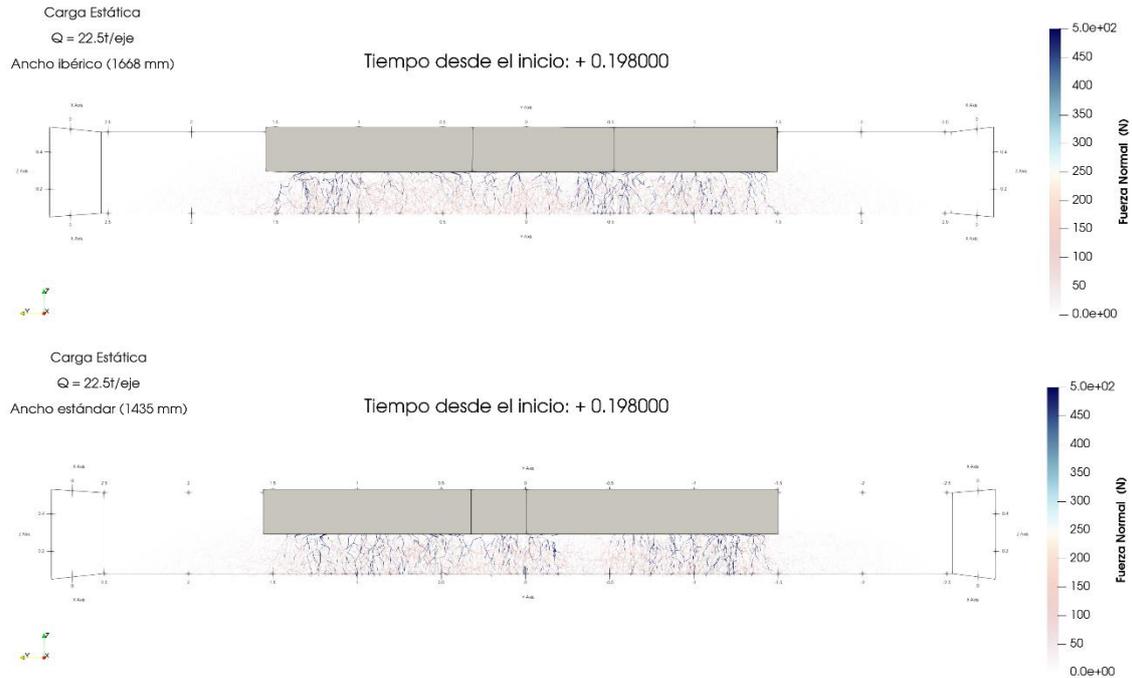
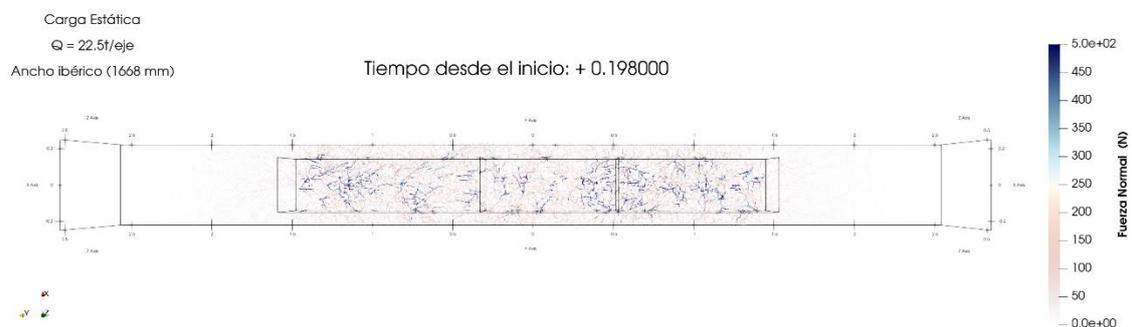


Ilustración 47. Representación en alzado de la fuerza normal entre partículas en ancho ibérico (superior) y en ancho estándar (inferior). (Elaboración propia)

Tras esto, se ha realizado un corte por debajo de la traviesa para observar las cadenas de fuerzas que actúan en esa zona. Se ha optado por representar la traviesa de una manera alámbrica para poder observar mejor las cadenas de fuerzas actuantes. Como se puede apreciar en la Ilustración 48 se vuelve a apreciar lo mencionado anteriormente, las cadenas de fuerzas en la vía de ancho ibérico (superior) se reparten mejor por toda la capa de balasto debido a la distribución homogénea que transmite la traviesa a la vía. En la vía de ancho estándar (inferior) se aprecia claramente ese hueco en la cadena de fuerzas el cual es producido por un contacto no homogéneo de la traviesa.



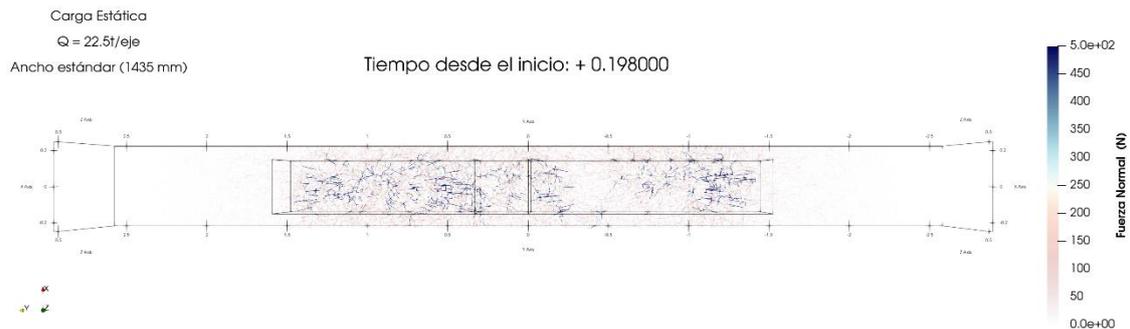


Ilustración 48. Representación en planta de la fuerza normal entre partículas en ancho ibérico (superior) y en ancho estándar (inferior). (Elaboración propia)

6.3 Solicitación estática con carga diferencial

6.3.1 Caracterización

Las circulaciones repetitivas de los trenes sobre la infraestructura, junto con el desgaste del balasto, los elementos de la vía y el material rodante generan situaciones en las que el balasto puede soportar la carga de manera desigual. El propósito de esta solicitud es evaluar el impacto de una concentración de peso de un eje en un lado de la traviesa. Este fenómeno puede ocurrir debido a planos en las ruedas, defectos en los carriles o diferencias en la compactación del balasto, lo que provoca que el peso del eje del tren se concentre en un lado de la traviesa. Por lo tanto, la aplicación de una carga diferencial lo que simula es los posibles defectos de una vía ferroviaria.

Para esta solicitud se ha elegido la carga por eje de una locomotora de la Serie 252 la cual tiene un peso máximo por eje de 22,5 toneladas como ya se comentó anteriormente. Se aplicará dicha carga a un modelo con una única traviesa, permitiendo su comparación con otras solicitudes. Con el fin de observar los mayores defectos de la vía se ha optado por realizar el análisis con una carga diferencial del 20 % lo cual correspondería con una vía en donde es necesario realizar operaciones de bateado debido al mal estado de esta lo cual causa que las cargas no se distribuyan homogéneamente y por tanto las cargas sobre ciertas partículas sea demasiado elevada produciendo así posibles roturas en el balasto. Es importante considerar que la carga total por eje se mantiene constante, aunque se distribuye de manera diferente sobre la traviesa. A continuación, se muestra una tabla con el valor en toneladas que se aplica a cada carril.

Diferencial de Carga	Q1	Q2
20 %	9 t	13,5 t

Tabla 18. Valor de la carga aplicado simulando el peso sobre cada carril, Q1 corresponde al lado izquierdo de la traviesa (carril común) y Q2 corresponde al lado derecho de la traviesa (carril correspondiente en cada ancho).
(Elaboración propia)

6.3.2 Descenso de la traviesa

El proceso de creación del modelo implica que la posición de la traviesa no es totalmente horizontal, lo que usualmente resulta en una diferencia de altura entre sus extremos. A pesar de que al principio pueda parecer erróneo y fuera de lo común permitir estas discrepancias, en realidad es posible que pequeñas diferencias de altura entre los bordes de las traviesas ocurran en ciertos tramos, aunque la presencia de los carriles evita que estas diferencias sean significativas entre traviesas consecutivas. En el caso de la traviesa única que estamos considerando, esto no es un inconveniente, ya que también permite que la traviesa se apoye correctamente sobre el balasto al no limitar los movimientos que podrían generar áreas voladizas.

Para analizar estos factores se recurre a la aplicación de una carga diferencial en la traviesa. Dicha carga permitirá analizar posibles defectos en la capa de balasto al aplicar más carga en un lado que en otro en la traviesa. Si bien es cierto, tal y como se ha comentado anteriormente, en la vida real los carriles limitarían un asiento diferencial, pero al analizar esto podemos conocer zonas en la capa de balasto en donde haya anomalías lo cual puede ser de utilidad para los equipos de mantenimiento de la vía.

Si analizamos el descenso general de la traviesa representado en la Ilustración 49 se observa que no hay grandes diferencias entre aplicar una carga diferencial o aplicar una carga simétrica a ambos lados de los carriles como la mostrada en la Ilustración 36 del apartado 6.2.2 "Descenso de la traviesa". El principal factor de que no se aprecien diferencias es porque al aplicar la carga diferencial en la traviesa esta tiende a nivelarse, es decir, la zona derecha la cual está más cargada desciende más, pero la zona izquierda de la traviesa desciende menos. Por lo tanto, la resultante es los descensos en la traviesa en la que se ha aplicado una carga diferencial acaba siendo casi similar a la de una traviesa con una carga igualitaria a ambos lados. Desde el punto de vista de la circulación de los trenes esto resulta bastante bueno ya que, aunque se generen ciertos peraltes en recta, no se van a producir aumentos exagerados en la dinámica vertical ya que el descenso total de la traviesa es el mismo que en la carga simétrica. Desde el punto de vista de la conservación de la capa de balasto es donde se generan los mayores problemas. Que haya un asiento diferencial en la traviesa genera que haya zonas del balasto que

estén altamente comprimidas lo cual puede llegar a ocasionar la fractura de estas y la pérdida de seguridad en la circulación en la vía. Por esto es útil este tipo de análisis ya que permite conocer posibles anomalías en la vía pudiendo anticipar así posibles labores de mantenimiento y conservación.

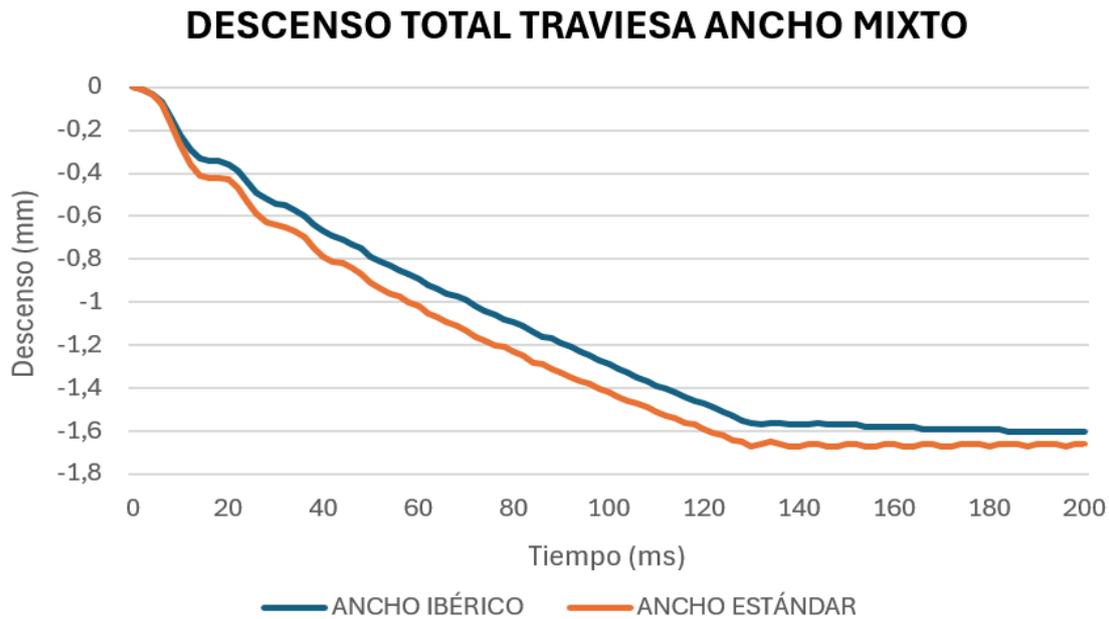


Ilustración 49. Gráfico representativo del descenso de la traviesa en función del ancho de vía tras la aplicación de una carga diferencial. (Elaboración propia)

Para poder analizar con exactitud lo mencionado anteriormente de los asientos diferenciales en la vía es necesario aislar un lado de la traviesa para poder observar dichos defectos. En la Ilustración 50 se representa el lado más desfavorable de la traviesa, es decir, el lado sobre el cual está recayendo una mayor carga. Los descensos que se analizan en esta gráfica son los correspondientes al borde inferior de la traviesa ya que, a la hora de producirse esa rotación en el longitudinal de la traviesa, es la zona en la cual se va a producir un mayor descenso. Como se puede observar en este caso si se analiza únicamente en lado donde está recayendo la mayor carga se puede comprobar que los resultados cambian bastante en comparación a cuando se analiza el descenso global. En este caso se puede observar que ambos anchos de vía descienden más que cuando la carga es simétrica, lo cual es lógico, ya que se está aplicando una carga mayor en esa zona y, por tanto, el descenso ha de ser también mayor.

La diferencia ocasionada en los descensos entre ambos anchos se analizará más en detalle cuando se analice el desplazamiento y velocidades del balasto, así como las cadenas de fuerzas, pero la diferencia en los descensos puede ser debida a la aleatoriedad en la generación del balasto y al contacto entre la traviesa y la capa de balasto.

DESCENSO LADO DERECHO TRAVIESA ANCHO MIXTO

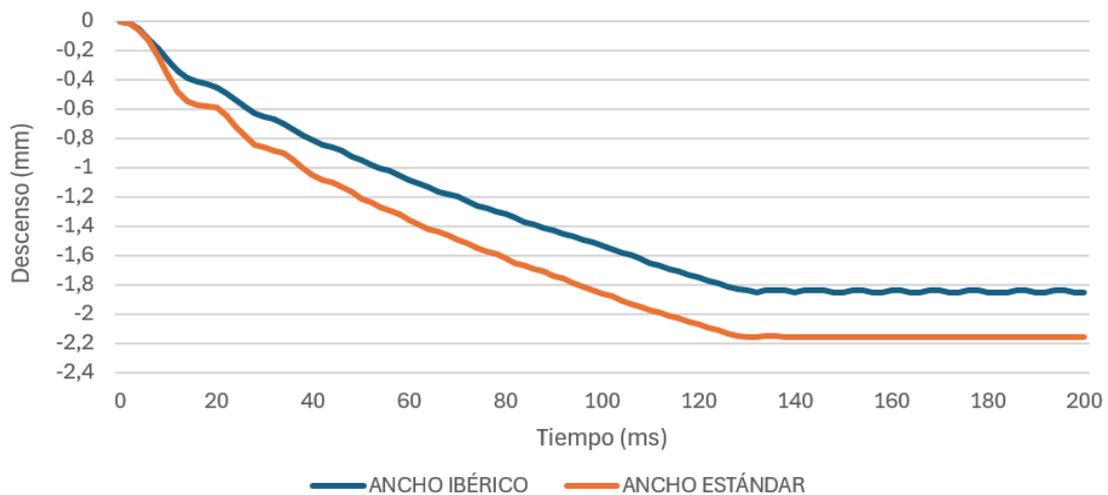


Ilustración 50. Representación del descenso del lado más cargado de la traviesa en ancho ibérico y en ancho estándar. (Elaboración propia)

En la Ilustración 51 se representa el descenso, pero ahora del lado izquierdo de la traviesa, lado en el cual está situado el carril común y el lado en el que la carga aplicada es menor. Se ha decidido representar este lado también para poder observar lo mencionado anteriormente. En un modelo, si un lado desciende más, el lado contrario descenderá menos y viceversa, es decir, la traviesa siempre intenta buscar el equilibrio debido a la compacidad del balasto.

DESCENSO LADO IZQUIERDO TRAVIESA ANCHO MIXTO

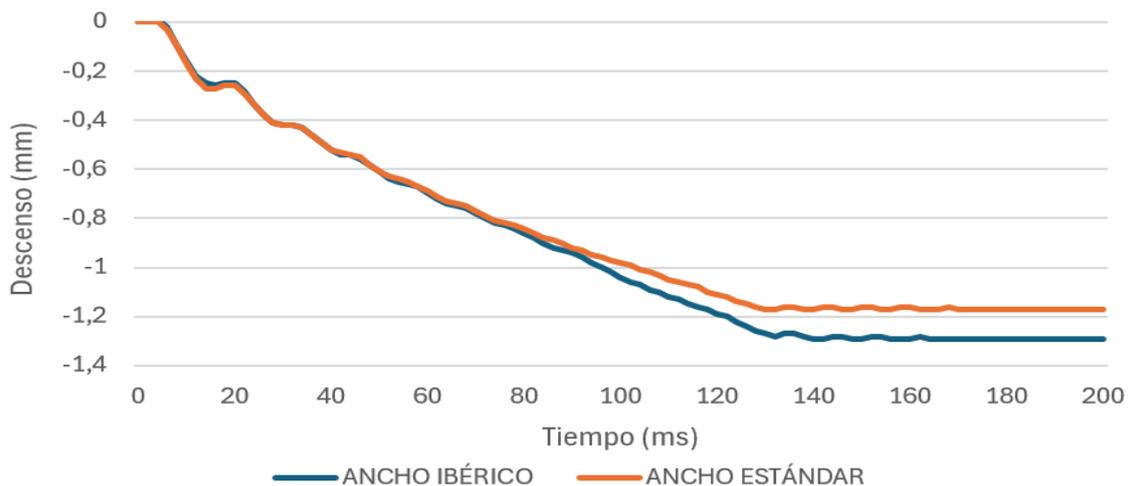


Ilustración 51. Comparativa del descenso del lado izquierdo de la traviesa en ancho ibérico y en ancho estándar. (Elaboración propia)

Tal y como se mencionaba anteriormente, si nos fijamos por ejemplo en la vía de ancho estándar, se puede observar como el lado derecho descendía más que el lado derecho de la vía de ancho ibérico. Sin embargo, al observar el lado izquierdo es, al contrario, desciende más el

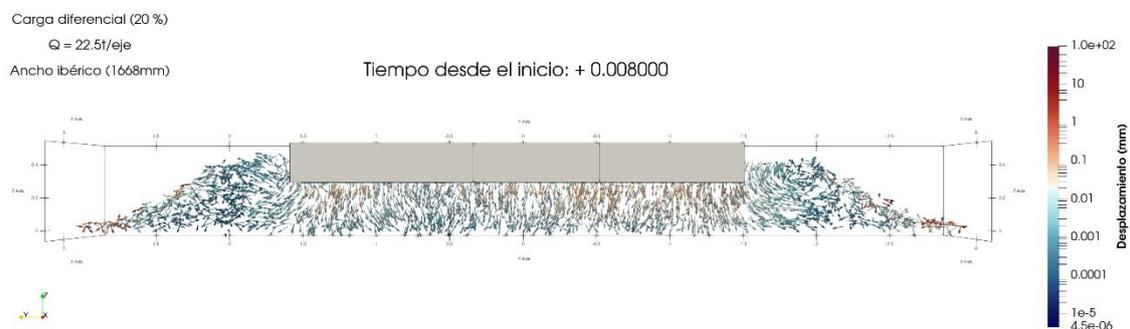
lado de la vía de ancho ibérico que el lado de la vía de ancho estándar. Esto se debe a que como se mencionaba la traviesa siempre busca una compensación y así queda reflejado en las ilustraciones anteriores. También cabe destacar que, aunque la traviesa tienda al balance la diferencia entre las cotas de un lado y el otro no son idénticas, es decir, si un lado desciende 2 mm el otro lado no tiene por qué descender 1 mm para que el descenso total sea de 1,5 mm. La traviesa tiende al equilibrio, pero los descensos de un lado y el otro no son directamente proporcionales.

6.3.3 Desplazamiento de las partículas de balasto

Desplazamiento tridimensional

A continuación, se representan una serie de desplazamientos en las tres dimensiones del espacio. Dos imágenes en un tiempo inicial y la última imagen al final del tiempo. Se ha decidido realizar esto ya que al analizar la capa de balasto podemos ver como se desplaza más el balasto en la zona cargada y la imagen ultima permite mostrar lo que se comentaba anteriormente del equilibrio de la traviesa y se puede apreciar como el lado más cargado hay más balasto desplazado pero el lado contrario también hay una cierta cantidad de este balasto que se desplaza. Estos desplazamientos no son muy elevados, sin embargo, destacan la desigualdad en la banqueta de balasto que puede causar asientos diferenciales, lo cual es peligroso para el tráfico.

Por lo tanto, si se observa la Ilustración 52 se puede comprobar como el lado derecho, correspondiente al lado del carril más cargado, las piedras de balasto sufren mayores asientos que en el lado izquierdo. Estos efectos se verán más en detalle en apartados posteriores cuando se analicen los desplazamientos de las partículas restringiendo el desplazamiento en dos direcciones y se muestre el desplazamiento en una única componente.



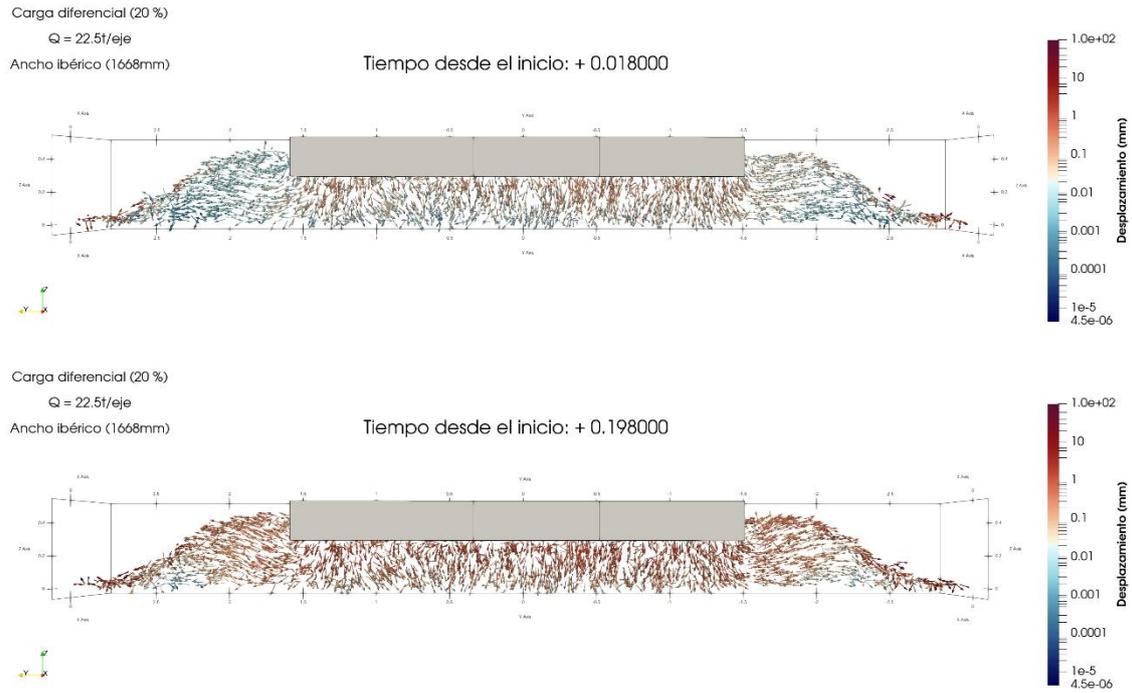
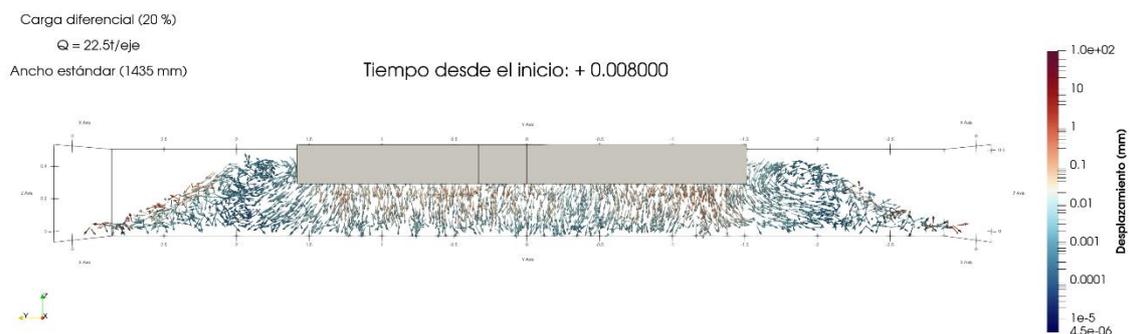


Ilustración 52. Serie de desplazamientos tridimensionales de las partículas de balasto tras la acción de una carga diferencial en ancho ibérico. (Elaboración propia)

A continuación, se procede a representar en la Ilustración 53 los desplazamientos del balasto para la vía de ancho estándar. Como era de esperar los resultados son bastantes similares con la única diferencia que en el tiempo 8 ms en la vía de ancho estándar el desplazamiento del balasto bajo traviesa es más uniforme que en ancho ibérico, es decir, aparentemente en la vía de ancho estándar no se aprecia tanto esa diferencia entre el lado derecho y lado izquierdo a la hora de los desplazamientos ocasionados por la diferencia de la carga.



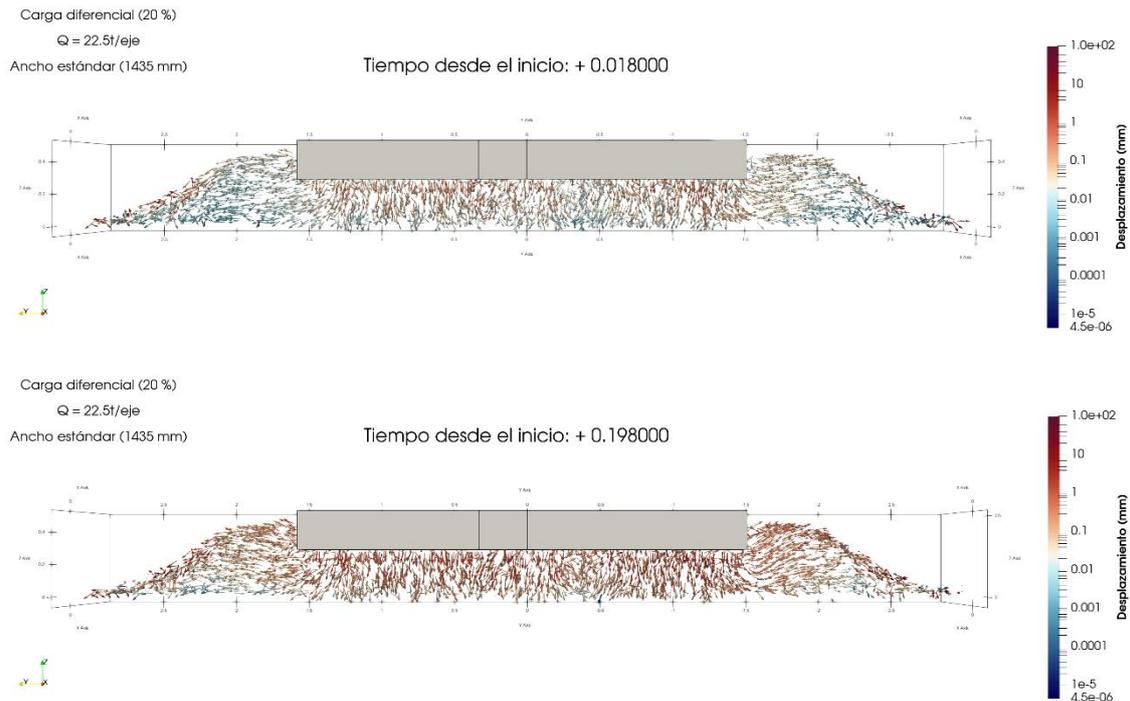


Ilustración 53. Serie de desplazamientos tridimensionales de las partículas de balasto tras la acción de una carga diferencial en la vía de ancho estándar. (Elaboración propia)

Desplazamiento vertical Eje Z

Al aislar el movimiento de las demás magnitudes y permitir solo el desplazamiento vertical de las partículas de balasto, se nota que la mayoría de estas han sido desplazadas hacia abajo en la zona donde se encuentra la traviesa, ignorando el desplazamiento de las partículas sueltas en los taludes debido a su derrame. Asimismo, al observar la proyección en planta, se puede identificar la zona de contacto de la traviesa por la notable tonalidad azul de las partículas. Se resalta que las partículas no caen de forma uniforme debajo de la traviesa debido a la irregularidad de la banqueta y el contacto desigual con la traviesa. Si comparamos la Ilustración 54 correspondiente al caso de carga diferencial con la ilustración obtenida en el apartado 6.2.3 "Desplazamiento de las partículas de balasto" correspondiente a una carga uniforme a cada lado se puede observar como las zonas del balasto situadas bajo la zona del carril derecho sufren una mayor coloración ocasionada por ese incremento de carga en el lado derecho.

Si comparamos los resultados obtenidos en ancho ibérico con los de ancho estándar se puede observar como en el primero de estos la zona derecha esta más cargada que la zona izquierda. Sin embargo, en la vía de ancho estándar los desplazamientos del balasto de debajo de la traviesa se reparten de manera más homogénea exceptuando la zona sin coloración azul la cual se debe a una zona en la cual la traviesa no apoya correctamente debido a la colocación aleatoria del balasto. Al no apoyar esa zona de manera correcta el descenso del lado derecho de

la traviesa aumenta al ser el área de apoyo menor. Esto queda reflejado en la gráfica del descenso del lado derecho representada anteriormente.

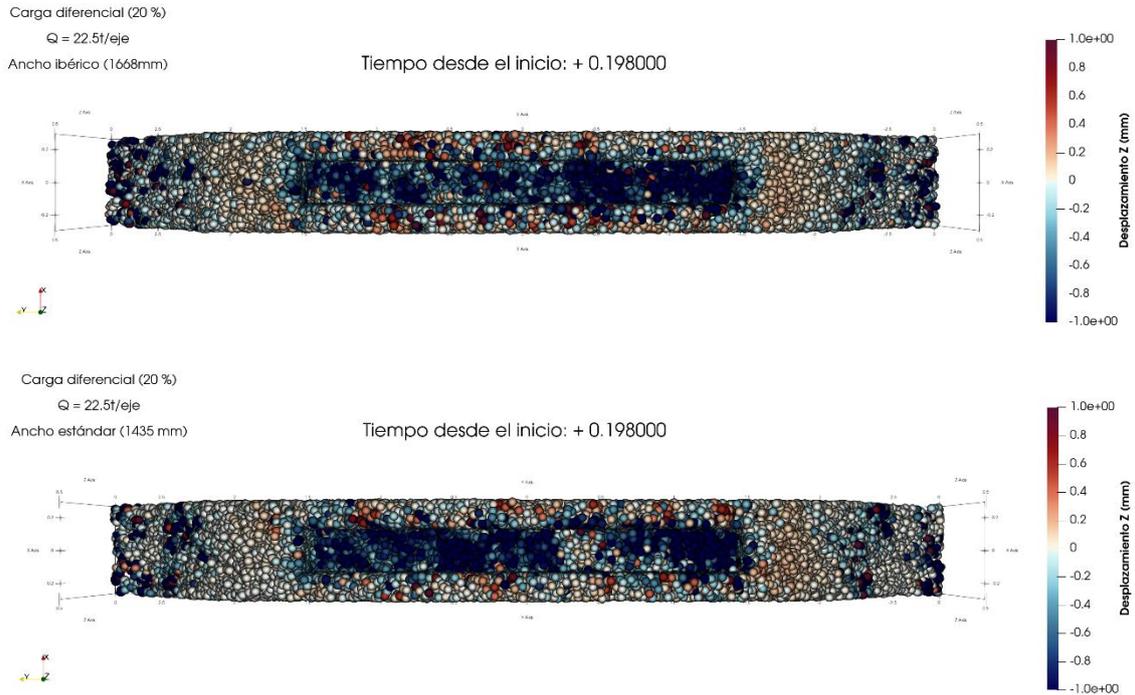
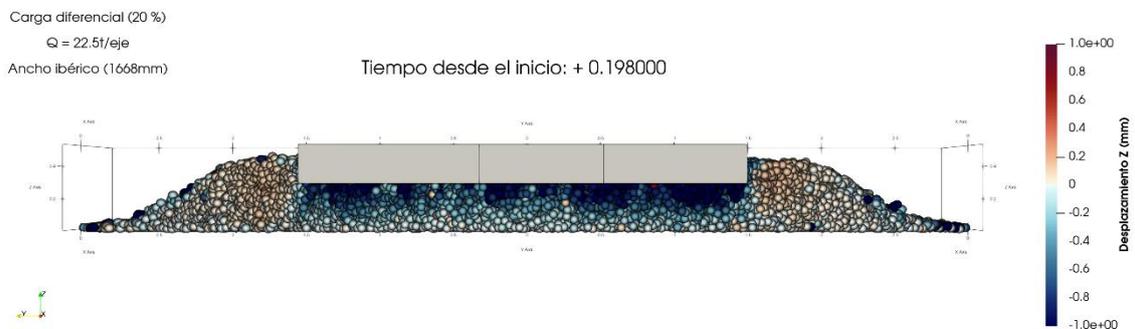


Ilustración 54. Vista en planta de los desplazamientos verticales de las partículas de balasto tras una carga diferencial. Comparativa entre ancho ibérico (superior) y ancho estándar. (Elaboración propia)

Además, si se realiza un corte transversal a la sección de la capa de balasto por el centro de la traviesa se puede apreciar aún más como descenden las piedras de balasto como se puede observar en la Ilustración 55. A rasgos generales las diferencias entre ambos anchos son pocas. La única diferencia significativa es esa zona sin coloración azul en la vía de ancho estándar y por consecuencia la mayor coloración del lado derecho. También se puede observar que la zona izquierda de la vía de ancho estándar tiene una menor coloración la cual es debida al intentar la traviesa equilibrarse, por lo tanto, al descender más el lado derecho el lado izquierdo descende menos.



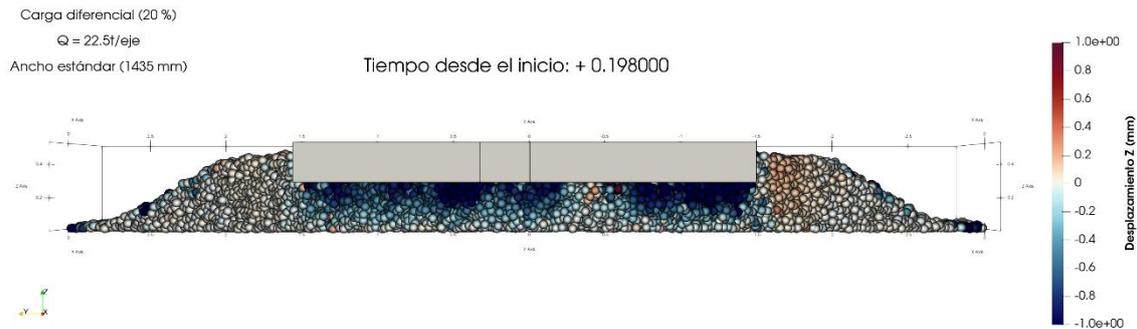


Ilustración 55. Vista en alzado de los desplazamientos verticales del balasto tras una carga diferencial. Comparativa entre ancho ibérico (superior) y ancho estándar (inferior). (Elaboración propia)

Desplazamiento horizontal Eje Y

Otro elemento clave en el movimiento de las partículas es el movimiento a lo largo del eje perpendicular de la vía. Si se ignoran los movimientos de las partículas que caen de la superficie debido al derrame, se puede notar que los desplazamientos transversales más grandes ocurren en los extremos de la traviesa. Estos movimientos son muy importantes en estas zonas porque la estructura de la traviesa responde de manera más marcada a las fuerzas externas, causando desplazamientos más notables que en otras partes de la vía.

A continuación, en la Ilustración 56 se representan los desplazamientos horizontales del balasto, representados en un color rojo los desplazamientos positivos (desplazamientos de las partículas hacia la izquierda) y en azul los desplazamientos negativos (desplazamientos de las piedras hacia la derecha). Ambos anchos presentan bastantes similitudes exceptuando la vía de ancho ibérico en el cual la hombrera izquierda tiene una mayor coloración debido a que al producirse un menor descenso el lado derecho de la traviesa, el lado izquierdo desciende más en comparación con el de ancho estándar. Este descenso en el lado izquierdo ocasiona un empuje descendente a las partículas de debajo de la traviesa en esa zona. Estas partículas a su vez crean un empuje lateral a las partículas colindantes, de ahí esa elevada coloración roja en la zona izquierda de la hombrera.

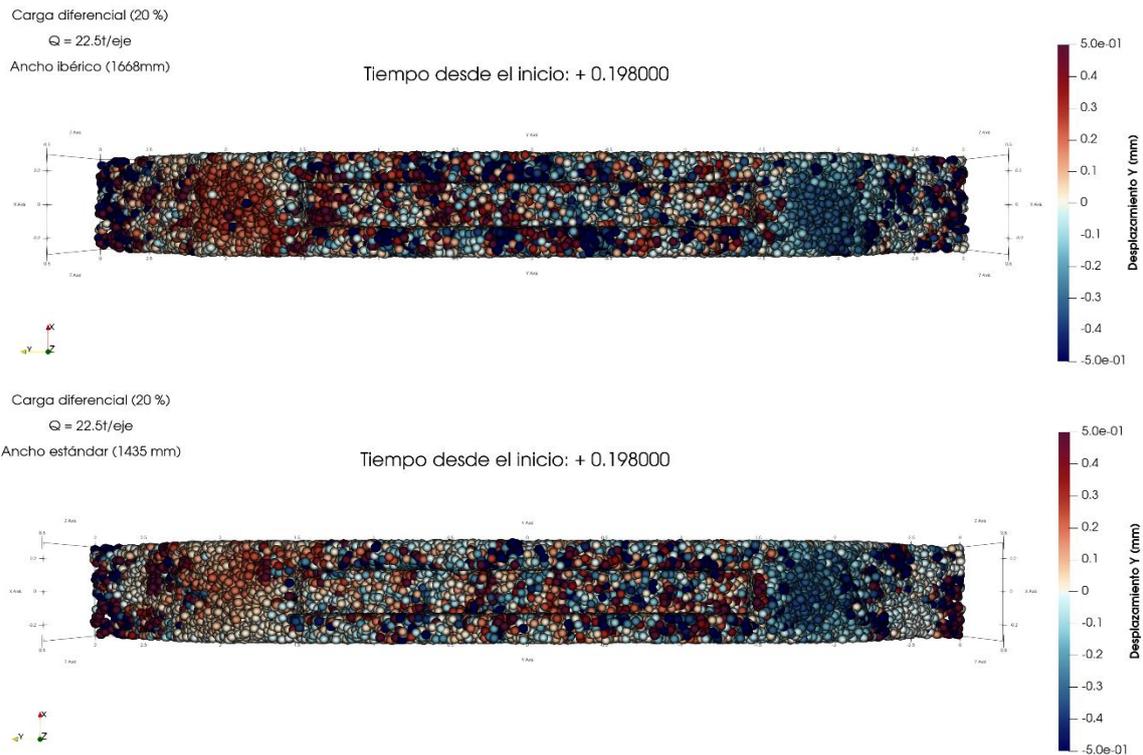


Ilustración 56. Comparativa en planta de los desplazamientos horizontales de las partículas de balasto en función del ancho de vía. (Elaboración propia)

Acto seguido, se ha llevado a cabo un corte transversal en la capa de balasto por el centro de la traviesa para observar una vista en alzado del comportamiento del balasto bajo la zona de la traviesa. Según se puede apreciar en la Ilustración 57, cuando se produce un desplazamiento horizontal, las partículas de balasto situadas debajo de la traviesa apenas experimentan movimiento ya que principalmente están sometidas a una carga vertical. Al observar las hombreras, es posible ver como el balasto se desplaza hacia afuera en esa área. Gracias a este corte se puede corroborar lo ya mencionado anteriormente, el balasto de la hombrera izquierda de la vía de ancho mixto sufre un mayor desplazamiento horizontal en comparación con la de ancho estándar debido al empuje de las partículas colindantes.

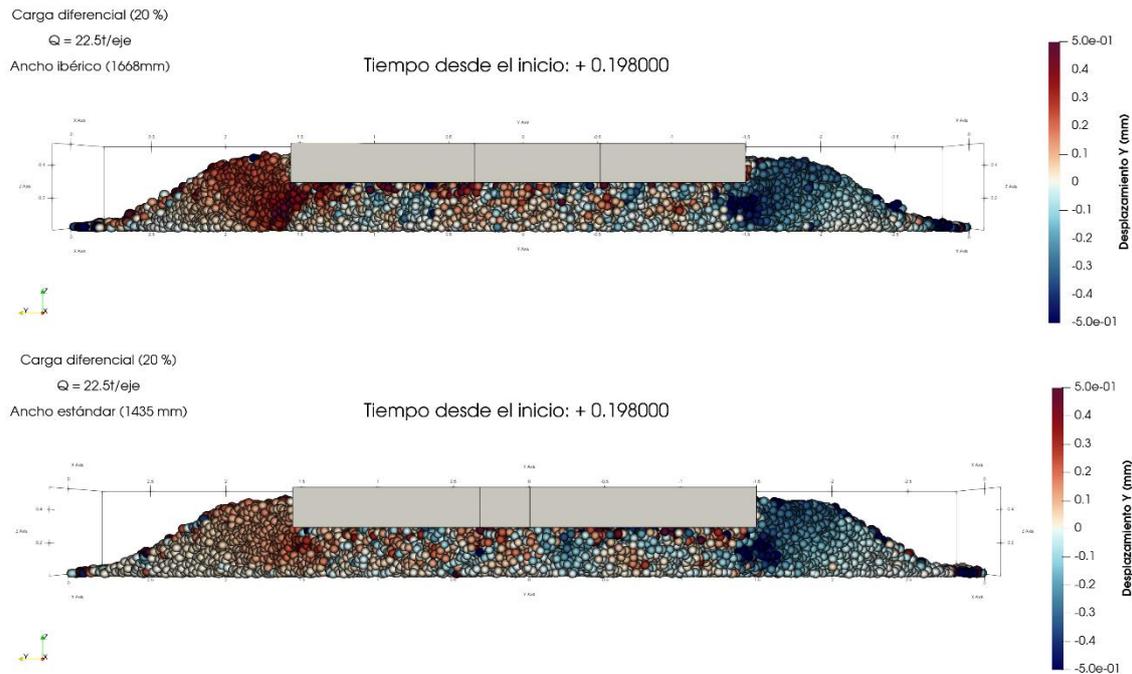


Ilustración 57. Comparativa en alzado de los desplazamientos horizontales del balasto en función del ancho de vía.
(Elaboración propia)

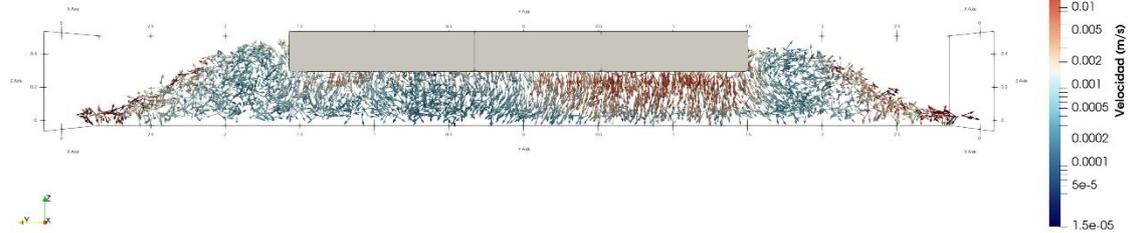
6.3.4 Velocidad de las partículas de balasto

A la hora de analizar las velocidades de las partículas de balasto es necesario estudiarlo en los primeros instantes en los que se aplica la carga ya que es en el momento en el cual las partículas van a adquirir una mayor velocidad. Para ello en este apartado se analizarán una serie de los primeros instantes de aplicación de las cargas para poder observar cómo se comportan la vía de ancho ibérico y ancho estándar frente a una sollicitación de carga diferencial.

A continuación, se muestra en la Ilustración 58 la secuencia temporal de la vía de ancho estándar. Como se puede observar, uno de los instantes más característicos es el tiempo 4 ms en el cual se aprecia como todas las partículas en movimiento con una velocidad considerable recaen sobre el lado derecho de la traviesa, es decir, el lado en el cual la carga es mayor debido a ese diferencial de fuerza. A partir de ese momento se puede observar como en los siguientes instantes las partículas del lado izquierdo empiezan a coger una cierta velocidad, pero siempre menor a las del lado derecho, ya que reciben menos carga.

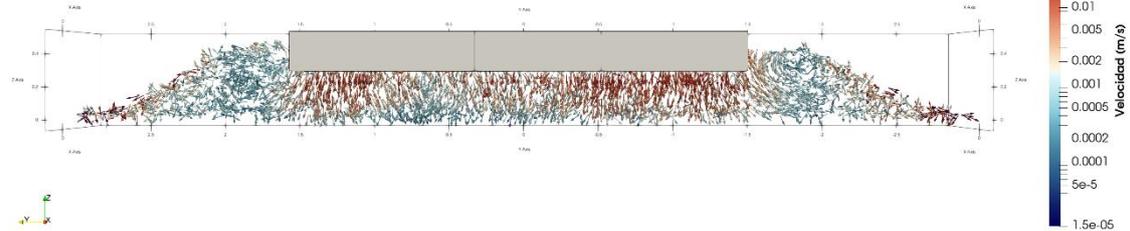
Carga diferencial (20 %)
 $Q = 22.5t/\text{eje}$
Ancho ibérico (1668mm)

Tiempo desde el inicio: + 0.004000



Carga diferencial (20 %)
 $Q = 22.5t/\text{eje}$
Ancho ibérico (1668mm)

Tiempo desde el inicio: + 0.006000



Carga diferencial (20 %)
 $Q = 22.5t/\text{eje}$
Ancho ibérico (1668mm)

Tiempo desde el inicio: + 0.008000

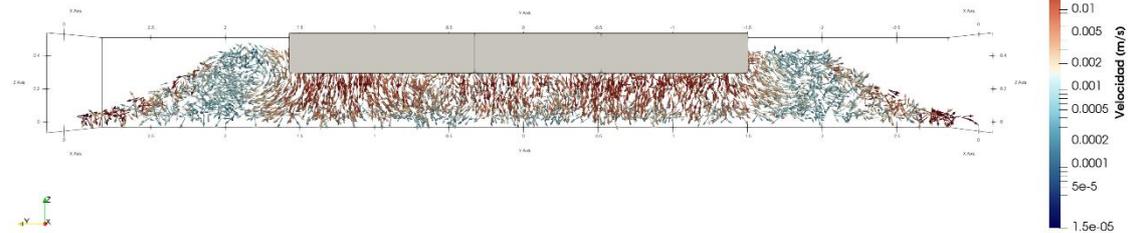


Ilustración 58. Serie de las velocidades de las partículas de balasto en ancho ibérico. (Elaboración propia)

Seguidamente, en la Ilustración 59 se procede a representar la velocidad de las partículas, pero ahora de la vía de ancho estándar. A rasgos generales, la velocidad de las partículas en ambos anchos es bastante similar. La única diferencia significativa es que, en la vía de ancho estándar, en el tiempo 4 ms en la zona izquierda de la traviesa se puede apreciar una zona de coloración un poco rojiza de las partículas lo cual indica que estas se están moviendo con una velocidad considerable. Otra diferencia con la vía de ancho ibérico es que en la vía de ancho estándar la mayoría de las partículas adquieren una velocidad considerable, sin embargo, en la vía de ancho ibérico solo las partículas situadas en la zona de carga adquieren velocidades significantes.

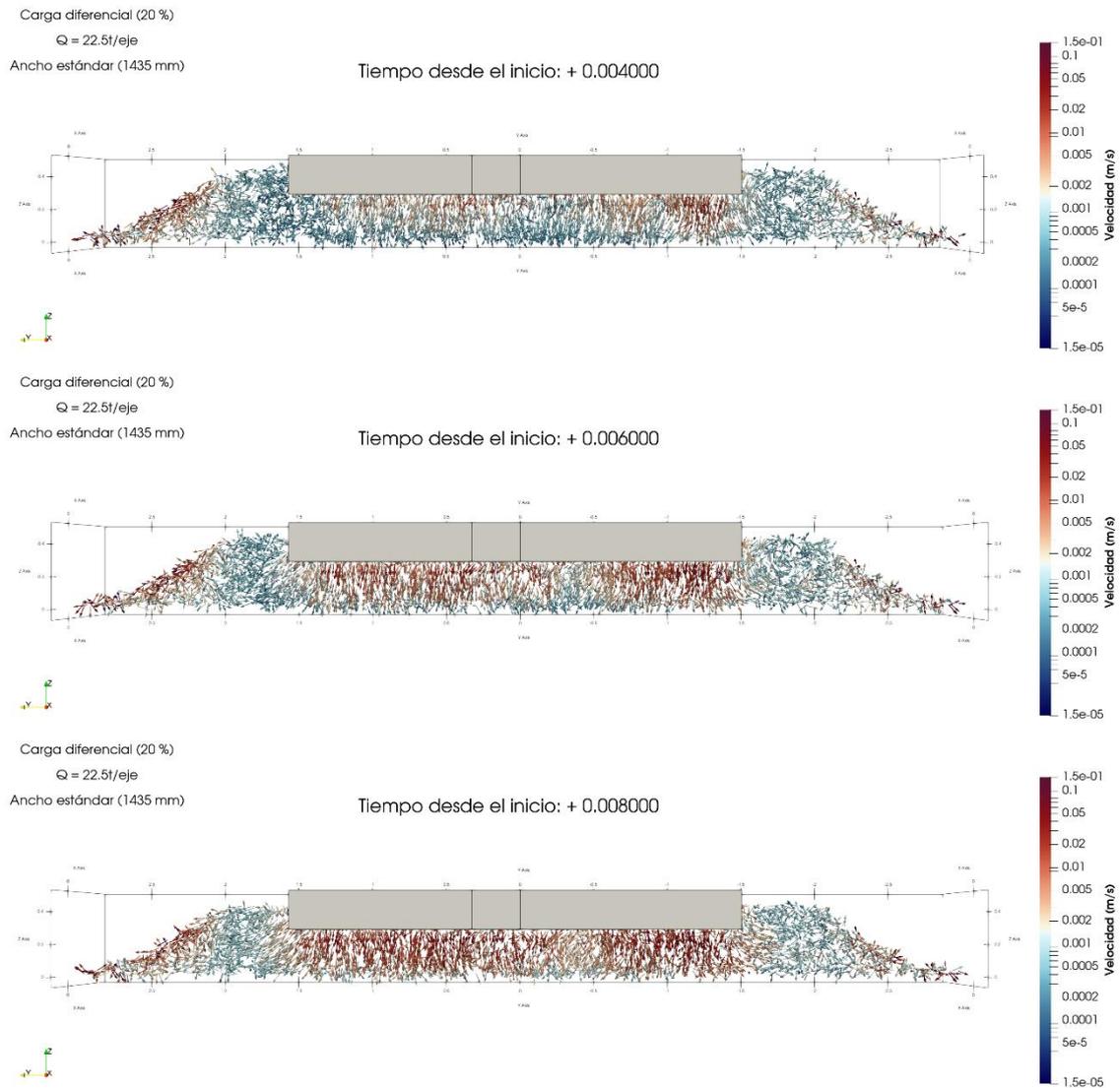


Ilustración 59. Secuencia de las velocidades de las partículas de balasto en ancho estándar. (Elaboración propia)

6.3.5 Cadena de fuerzas

Las cadenas de fuerza ayudan a visualizar la distribución de la fuerza normal entre las piedras de balasto a lo largo del espesor de la capa. Esta representación es esencial porque nos da una comprensión precisa y realista de la distribución de carga en el balasto. Además, las cadenas de fuerzas pueden servir para localizar zonas donde se generen altas tensiones debidos a estos contactos, sobre todo cuando se trate de cargas diferenciales ya que la carga recae sobre un lado de la capa de balasto.

A continuación, se representa en la Ilustración 60 una comparativa entre ambos anchos en un tiempo cercano a mitad del proceso de aplicación de la carga. Como se puede apreciar en la vía de ancho ibérico el lado derecho esta más cargado que en la vía de ancho estándar aun siendo el mismo tiempo en ambos anchos. Además, se puede apreciar la vía de ancho estándar ese vacío en la cadena de fuerzas al no haber una interacción fuerte entre las piedras de balasto.

Esto se debe a que la traviesa en esa zona no está en contacto con el balasto al ser una superficie irregular.

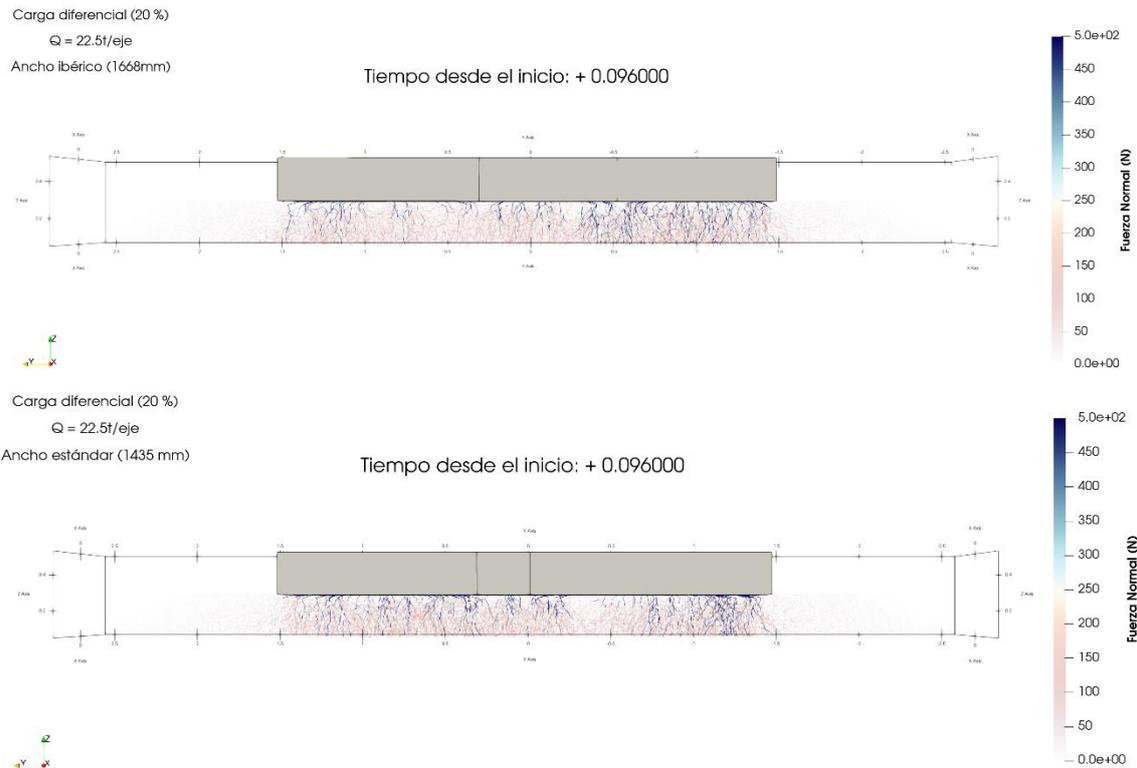
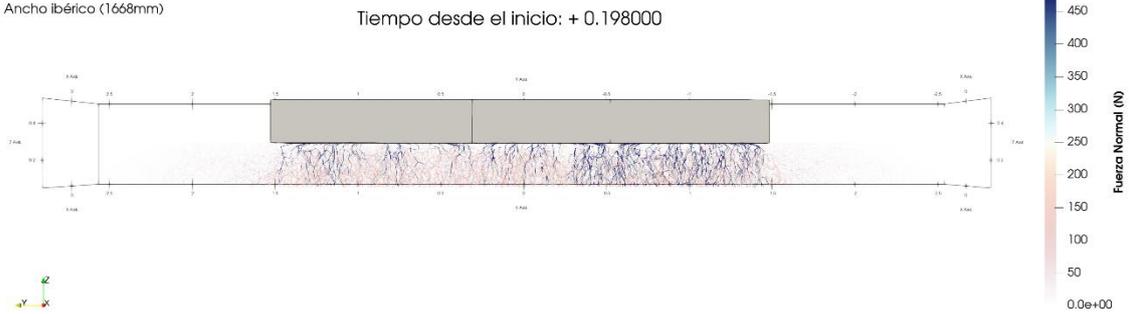


Ilustración 60. Comparativa de ambos anchos de vía en alzado de la fuerza normal entre las partículas de balasto a mitad del proceso de aplicación de la carga. (Elaboración propia)

Acto seguido se procede a representar en la Ilustración 61 el tiempo último de la aplicación de la carga, es decir, el momento en el que se ha aplicado la carga en su totalidad. Como es lógico los efectos se ven aumentados en comparación con la Ilustración anterior la cual corresponde a un periodo de 96 ms. Otra cosa que resaltar es la cadena de fuerzas del lado derecho de la vía de ancho estándar, el cual, al haber una zona sin cadena de fuerzas apreciable, la cadena del borde derecho de la traviesa presenta una fuerte coloración y entramado de cadenas ya que en esa zona se están generando grandes compresiones. Estas compresiones pueden generar rotura del balasto por lo cual es importante realizar las operaciones de bateado corrigiendo así las posibles cargas diferenciales.

Carga diferencial (20 %)
 $Q = 22.5t/\text{eje}$
Ancho ibérico (1668mm)



Carga diferencial (20 %)
 $Q = 22.5t/\text{eje}$
Ancho estándar (1435 mm)

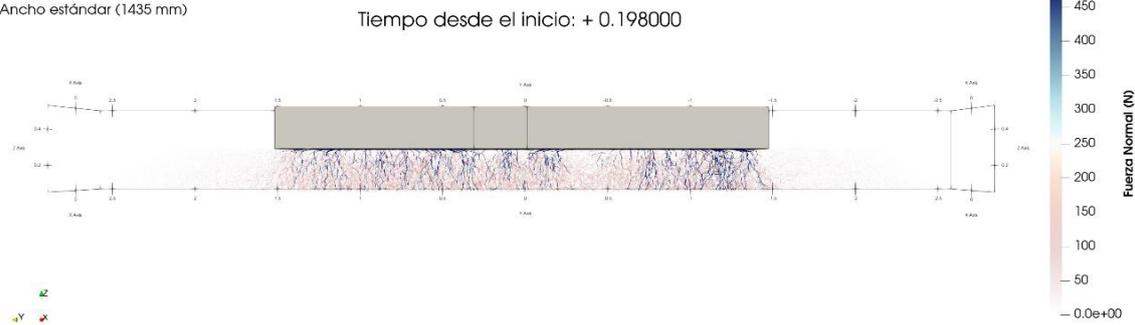
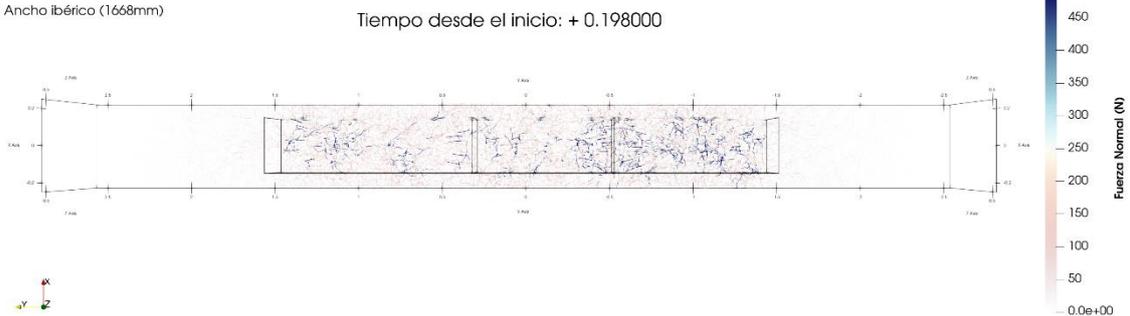


Ilustración 61. Comparativa en alzado de las cadenas de fuerzas normales en la capa de balasto en el momento de máxima aplicación de la carga. (Elaboración propia)

Finalmente, en la Ilustración 62 se muestra un corte por debajo de la traviesa para poder observar el comportamiento de las cadenas de fuerzas justo en la zona de debajo de la traviesa. Para esto se ha optado por representar la traviesa de forma transparente para poder observar mejor las cadenas. Estas vistas en alzado ayudan a tener una visión en todas las direcciones de las cadenas de fuerzas y corroborarse entre sí.

Carga diferencial (20 %)
 $Q = 22.5t/\text{eje}$
Ancho ibérico (1668mm)



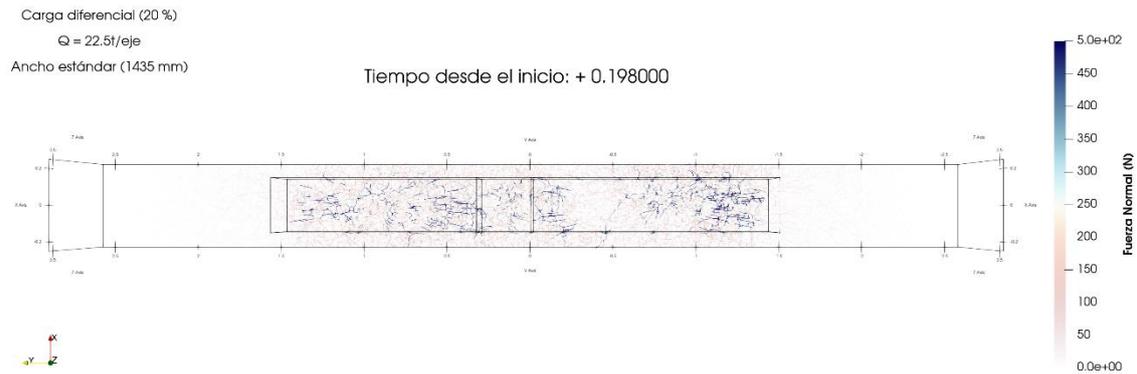


Ilustración 62. Comparativa en planta de las cadenas de fuerzas normales en la capa de balasto en el momento de máxima aplicación de la carga. (Elaboración propia)

6.4 Solicitación cuasi – estática

6.4.1 Caracterización

El objetivo de este apartado es calcular el efecto causado por la velocidad de los trenes y los defectos de la vía mediante una carga cuasi - estática, utilizando el factor de mayoración propuesto por Eisenmann para cargas estáticas. Para ello se llevarán a cabo dos simulaciones en las cuales se simulará la circulación de una locomotora de la Serie 252. Dado que este tipo de locomotora puede circular tanto por vías de ancho estándar como por vías de ancho ibérico, se simulará la circulación por ambos anchos para poder observar posibles características. Además, dado que uno de los factores del coeficiente de mayoración dinámica es la velocidad se ha optado por realizar dichas simulaciones a unas velocidades de 80 y 160 km/h.

Cabe resaltar que la locomotora 252 es una de las más pesadas que circulan por el territorio español con una carga máxima por eje de hasta 22,5 toneladas. Por lo tanto, el gran peso de esta y la elevada velocidad que puede alcanzar hacen fundamental su estudio debido a que es el material motor que mayores desperfectos puede ocasionar a la capa de balasto y a todo el conjunto de la vía.

Material Rodante	Velocidad (km/h)	Carga (t/eje)	Carga por eje mayorada (t/eje)
Serie 252	80	22,5	30,22
Serie 252	160	22,5	34,08

Tabla 19. Casos de carga analizados en la sollicitación cuasi – estática. (Elaboración propia)

6.4.2 Caso 1: Velocidad de 80 km/h

6.4.2.1 Descenso de la traviesa

En la Ilustración 63 se representa el descenso de la traviesa en función de los anchos para una velocidad de 80 km/h, ancho ibérico y ancho estándar. De acuerdo con lo preestablecido por el criterio de Eisenmann, el descenso de la traviesa es mayor a medida que aumenta la velocidad del tren debido al incremento de la carga por eje. Esto se puede ver a simple vista si se comparan los descensos de la traviesa producidos por la sollicitación estática frente a los de la sollicitación cuasi - estática.

No obstante, la diferencia entre el asiento de la traviesa al aumentar la velocidad de paso no es demasiado elevado ya que se pasa de tener descenso de entre 1,6 y 1,66 a pasar a descensos en carga cuasi – estática de 1,9 y 1,96, es decir, los efectos dinámicos verticales suponen 0,3 mm cuando se trata de una velocidad de 80 km/h. Gracias a esto se puede observar que un incremento en el valor de la carga no es directamente proporcional al descenso producido en la vía.

Se puede concluir que cambios en la velocidad de un tren en un servicio regular no causan diferencias significativas en los asientos sobre las traviesas de la vía. Por eso, en un tramo convencional como el del estudio actual, la velocidad de los trenes no influye de manera condicionante en los asientos verticales generados. Sin embargo, hay una variación al añadir los efectos dinámicos en comparación con la carga estática. Por lo tanto, es aconsejable tener en cuenta siempre los efectos dinámicos de los trenes al planificar labores de mantenimiento o reparaciones en la capa de balasto de la vía.

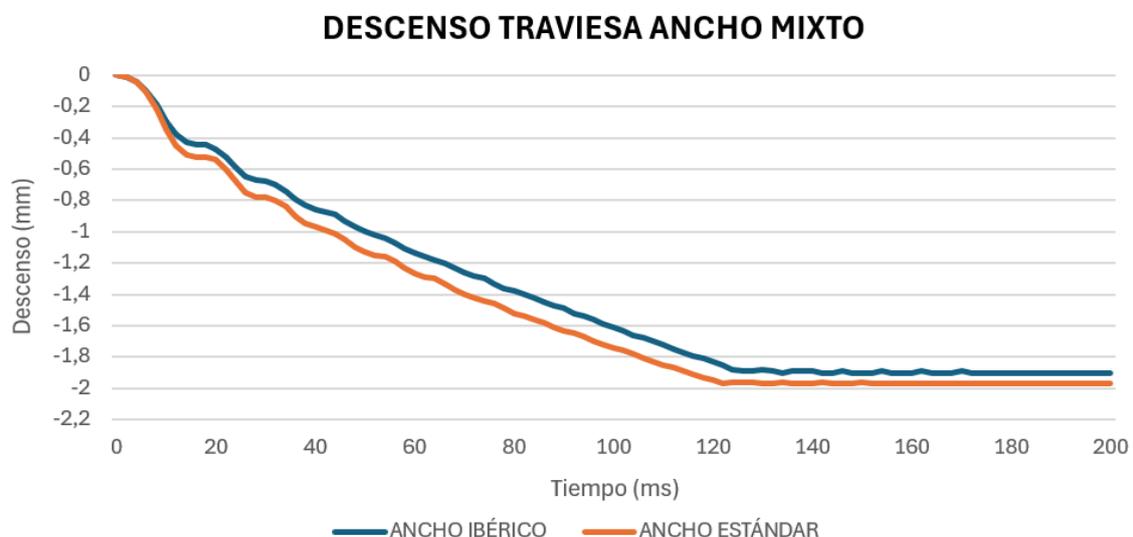


Ilustración 63. Gráfica representativa del descenso producido por la carga mayorada por el criterio de Eisenmann en función del ancho de vía. (Elaboración propia)

6.4.2.2 Desplazamiento de las partículas de balasto

Desplazamiento tridimensional

Desde un punto de vista cualitativo, el desplazamiento de las partículas de balasto bajo una carga cuasi - estática es similar al generado por una carga estática, ya que la única diferencia entre ambas radica en la cantidad de carga que se aplica debido al factor de amplificación dinámico. Por lo tanto, se evidencian los mismos efectos vistos en la solicitud estática pero amplificados con ese coeficiente de mayoración dinámico al tratarse de cargas cuasi – estáticas. En la Ilustración 64 se observa una secuencia de los desplazamientos de las partículas de balasto bajo la acción de la carga cuasi – estática simulando el paso de un Serie 252 mayorado a una velocidad de 80 km/h.

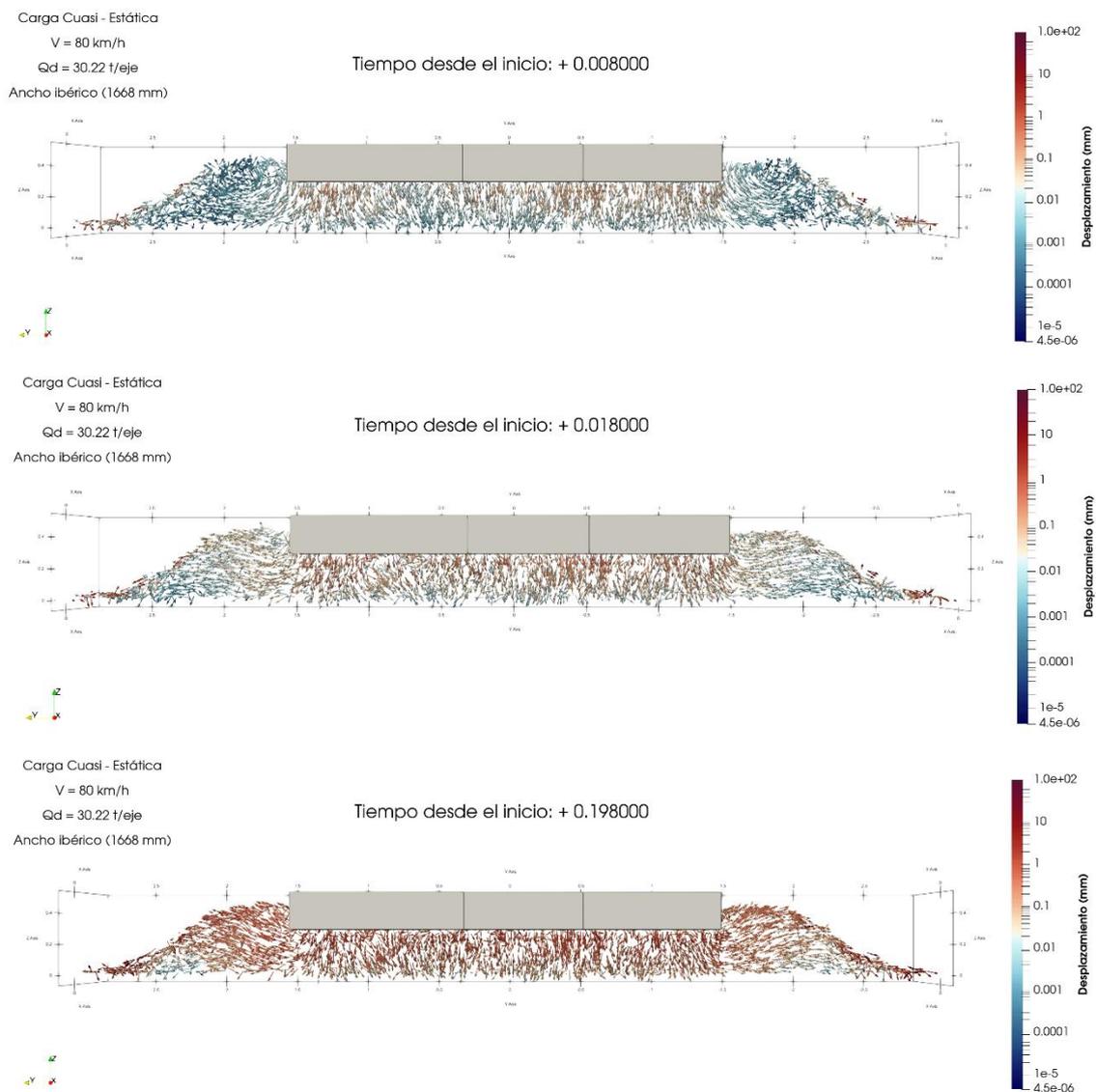
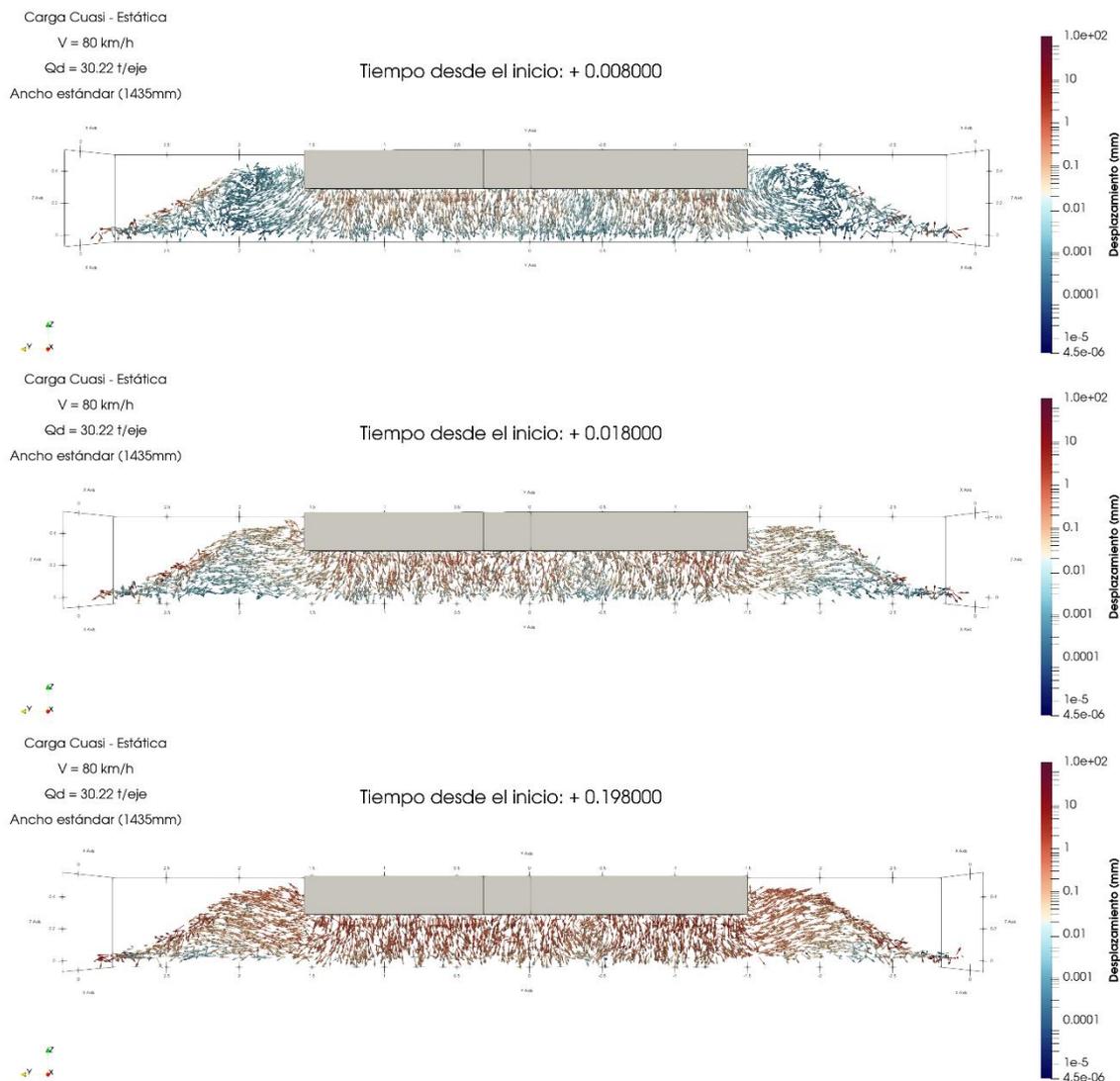


Ilustración 64. Secuencia de los desplazamientos tridimensionales del balasto en ancho ibérico por una carga cuasi – estática. (Elaboración propia)

A continuació, en la Il·lustració 65 se representa la mateixa seqüència, però ara per a la via de ancho estàndar. Com es pot observar la diferència d'aquest ancho amb el de ancho estàndar no són molt significatives. L'única diferència a simple vista és que, en el moment de màxima aplicació de la càrrega, és a dir, després d'haver transcorregut un temps des de l'inici de 198 ms, el desplaçament de les partícules de la via de ancho estàndar està millor organitzat, és a dir, les partícules descendeixen més verticalment que en el cas de ancho ibèric.



Il·lustració 65. Seqüència de les desplaçaments tridimensionals de les partícules de balast en ancho estàndar per una càrrega quasi – estàtica. (Elaboració pròpia)

Desplaçament vertical Eje Z

En la Il·lustració 66 se ha representat una comparativa en planta de les desplaçaments verticals entre la via de ancho ibèric i la de ancho estàndar. Com es pot observar, les principals diferències entre els anchs són com la via de ancho ibèric reparteix millor la càrrega sobre totes les partícules de sota de la travessa. Sin embargo, en la via de ancho estàndar se

puede apreciar esa zona sin coloración azul la cual hace indicar una zona de no contacto de la traviesa con el balasto.

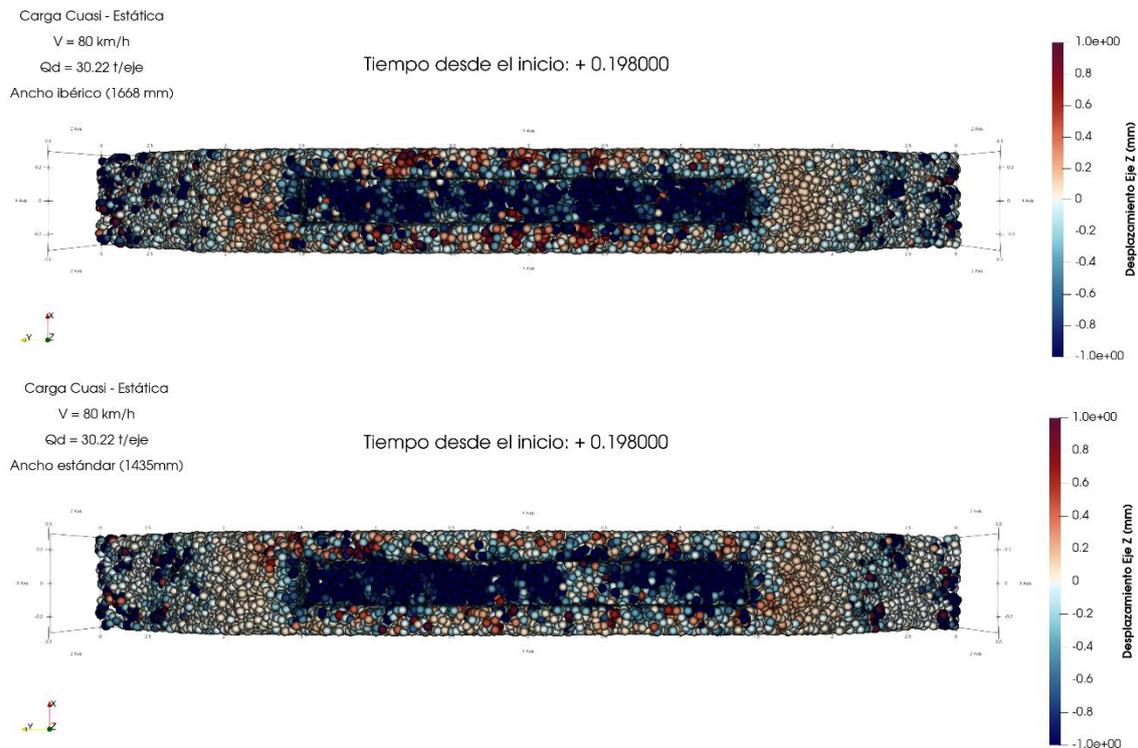


Ilustración 66. Comparativa en planta entre anchos del desplazamiento vertical tras la aplicación de una carga cuasi – estática. (Elaboración propia)

Seguidamente se ha representado el desplazamiento vertical pero ahora con una vista en alzado. Se ha decidido realizar esta vista para saber cuál es la profundidad en la capa de balasto de las partículas afectadas. Como se puede observar en la Ilustración 67 en la vía de ancho ibérico las partículas más afectadas por el desplazamiento son las más cercanas a la zona bajo traviesa, debido principalmente a que este ancho de vía está repartiendo mejor la carga. Sin embargo, en la vía de ancho estándar hay partículas a mayor profundidad afectadas por la carga y que tienen un cierto desplazamiento. Esto se debe a que al haber una zona en el modelo en el cual no se produce casi contacto, el resto de las partículas ha de aguantar una mayor carga y por tanto hay más partículas afectadas repercutiendo así en más cantidad de partículas sufriendo un desplazamiento considerable.

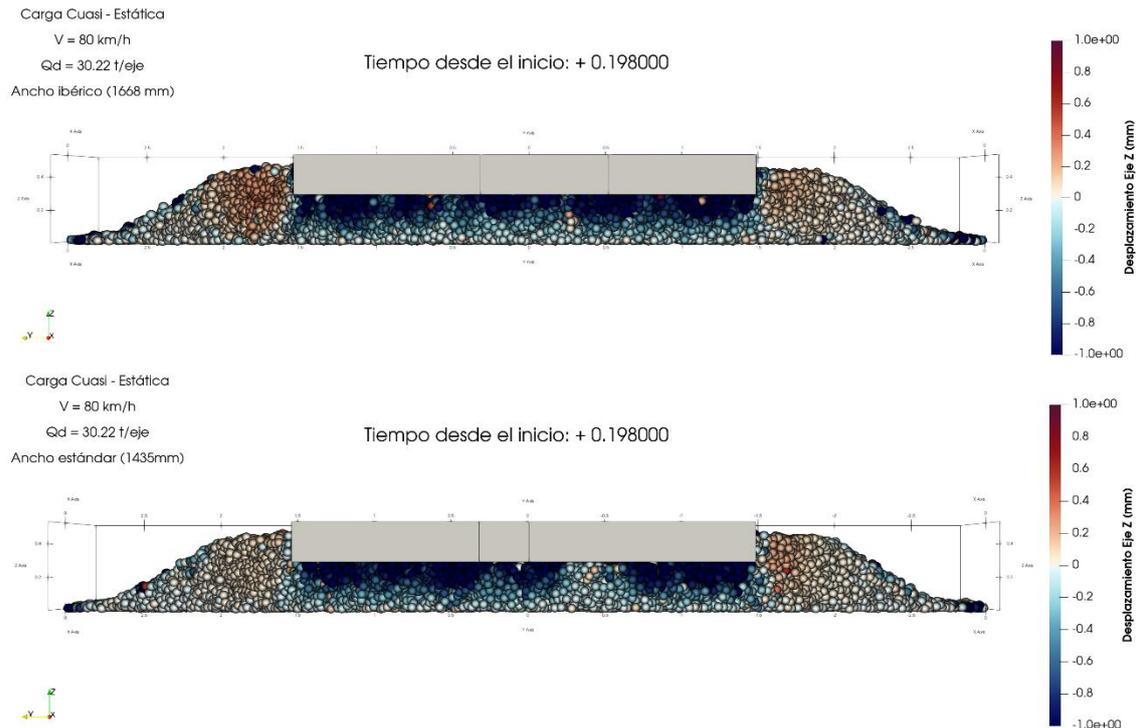


Ilustración 67. Comparativa en alzado entre anchos del desplazamiento vertical tras la aplicación de una carga cuasi – estática. (Elaboración propia)

Desplazamiento horizontal Eje Y

El desplazamiento horizontal es la segunda componente más importante en los desplazamientos del balasto por lo cual es importante analizarla con detalle para poder observar los posibles defectos que ocurran en la capa de balasto. Principalmente los desplazamientos del balasto en horizontal repercuten en la estabilidad de las hombreras, lo cual provoca que haya un derrame de esta y se pierda cierta estabilidad horizontal.

En la Ilustración 68 se muestra una comparativa entre los dos anchos en donde se representa los desplazamientos horizontales de las partículas de balasto en una vista en planta. Se puede observar como el balasto de la zona bajo traviesa no sigue un patrón claro en los desplazamientos ya que las partículas se mueven hacia la derecha e izquierda. En donde se puede observar un patrón de desplazamiento claro es en las hombreras tanto del ancho estándar como del ancho ibérico, siendo este último en el cual hay mayor desplazamiento del balasto de las hombreras, sobre todo en el lado izquierdo de la traviesa.

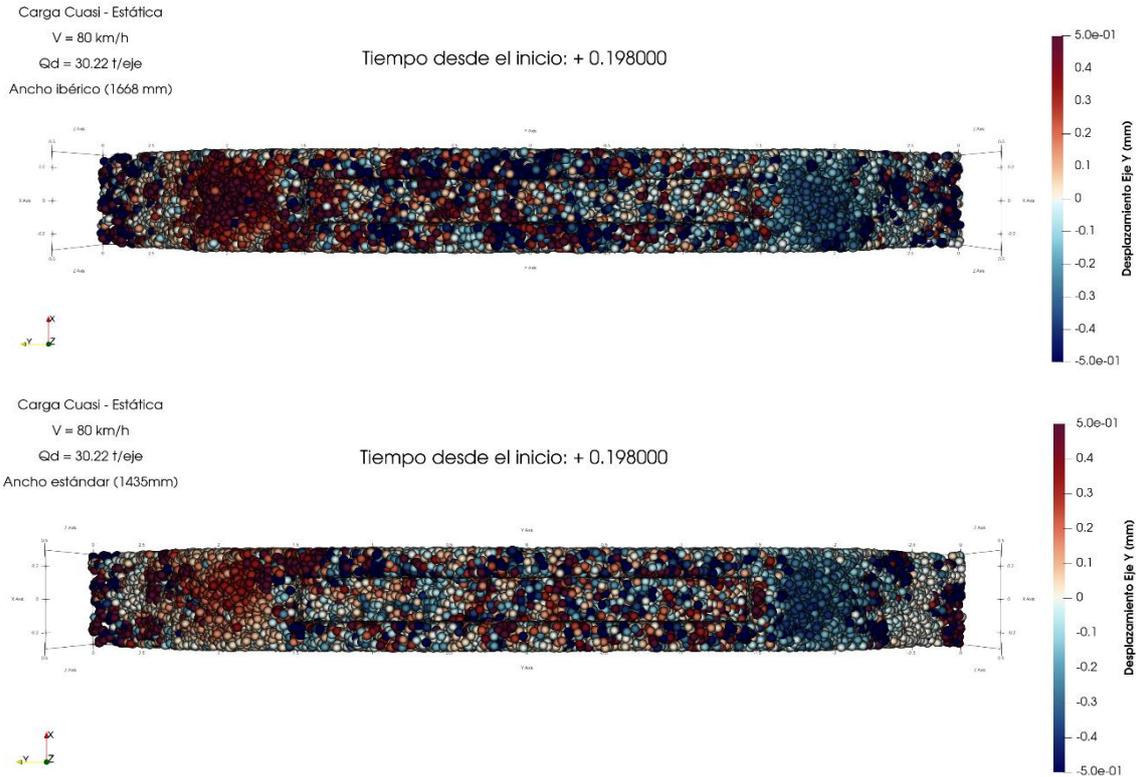
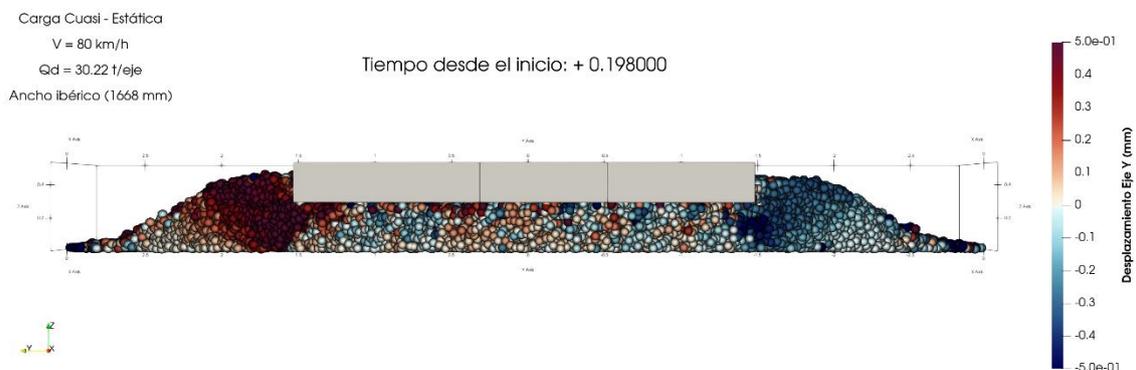


Ilustración 68. Representación del desplazamiento horizontal en planta en función del ancho de vía. (Elaboración propia)

A continuación, se ha representado en la Ilustración 69 el mismo desplazamiento horizontal con la salvedad de que en este caso se ha realizado un corte por el centro longitudinal de la traviesa pudiendo observar así una vista en alzado de la capa de balasto. Como se puede observar, el ancho ibérico sufre una fuerte coloración en las hombreras de la traviesa en comparación con la vía de ancho estándar. Esto se debe a que como pudimos ver en el desplazamiento tridimensional, en la vía de ancho ibérico las partículas no seguían una dirección general y muchas de las partículas se desplazaban de manera horizontal lo cual ha provocado el claro desplazamiento del balasto de las hombreras.



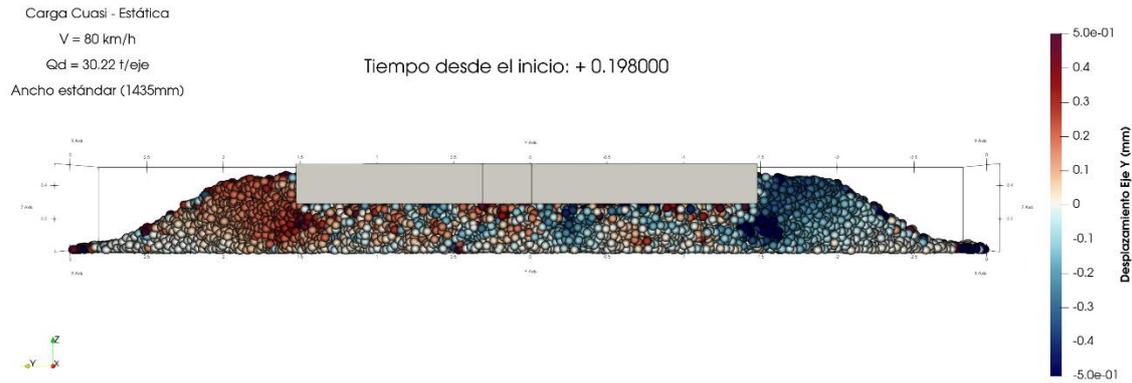
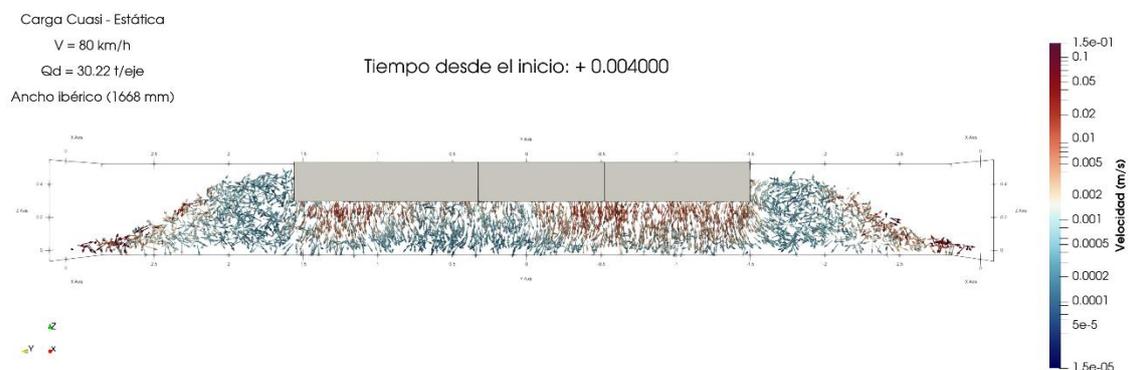


Ilustración 69. Representación del desplazamiento horizontal en alzado de las partículas en función del ancho de vía.
(Elaboración propia)

6.4.2.3 Velocidad de las partículas de balasto

A la hora de realizar el análisis de la velocidad de las partículas de balasto es importante realizarlo en los primeros instantes de aplicación de la carga ya que con el transcurso de esta las velocidades irán disminuyendo al estar las partículas cada vez más compactadas. Como era de esperar la velocidad de las partículas de balasto sigue el mismo patrón que en la carga estática con la única diferencia que, al tratarse de una carga cuasi – estática y por tanto un mayor valor de carga, hay más partículas afectadas y por tanto más partículas que adquieren una velocidad considerable.

En la Ilustración 70 se representa una secuencia de los desplazamientos del balasto para una carga cuasi – estática y una velocidad de 80 km/h para la vía de ancho ibérico. Como se puede observar, el final de la secuencia es el instante de tiempo 8 ms, ya que tal y como se ha comentado anteriormente, la mayor velocidad de las partículas de balasto se alcanza en los primeros instantes de tiempo. Las principales diferencias en velocidad en comparación con la sollicitación estática es que en este caso hay un mayor número de partículas con un valor de velocidad significativa.



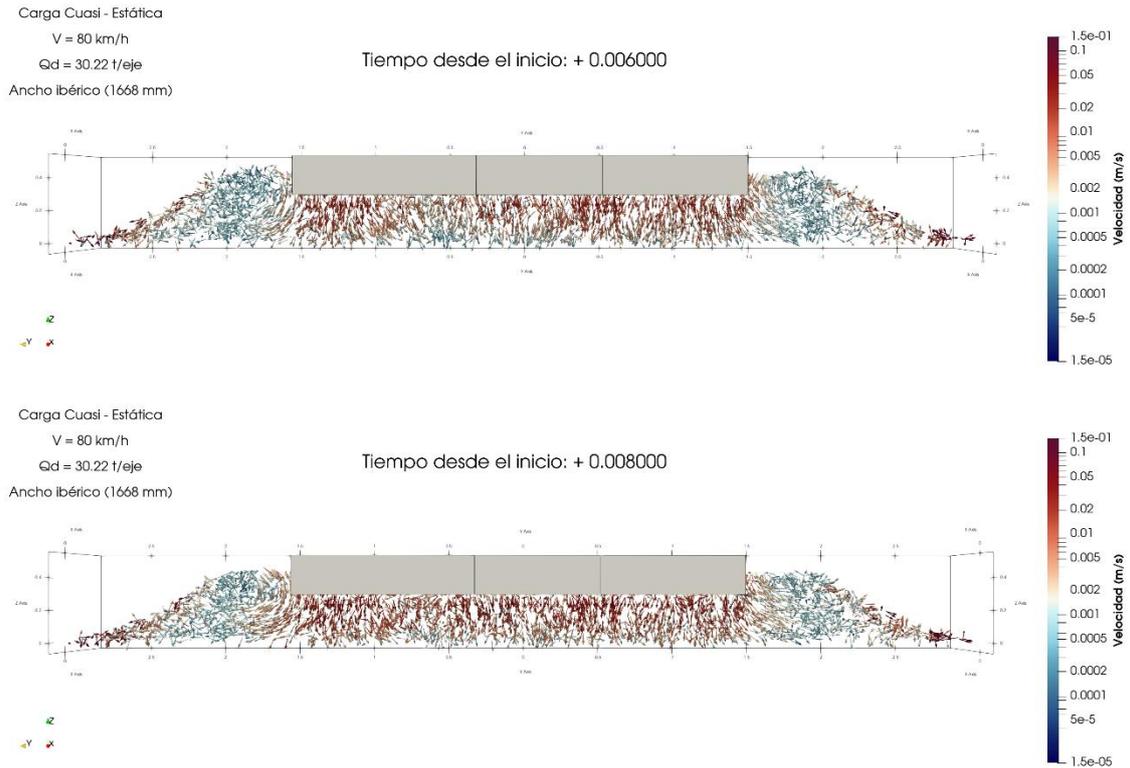
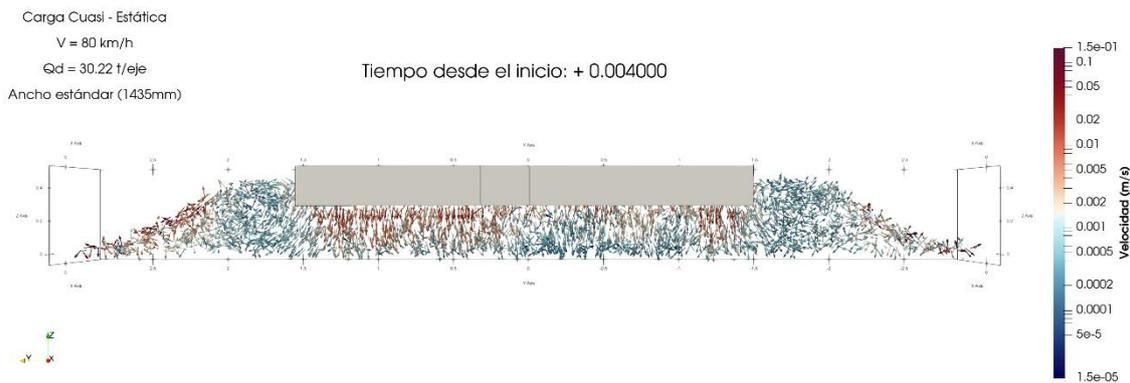


Ilustración 70. Representación de la secuencia de velocidades para la capa de balasto en la simulación de ancho ibérico. (Elaboración propia)

Acto seguido se representa en la Ilustración 71 la velocidad de las partículas, también de forma tridimensional, pero para la vía de ancho estándar. Como era de esperar ambos anchos presentan bastantes similitudes. La principal diferencia apreciable a simple vista es que en la vía de ancho estándar las partículas adquieren velocidad más rápido que en el de ancho ibérico, como se puede apreciar en la figura representativa del tiempo 6 ms.



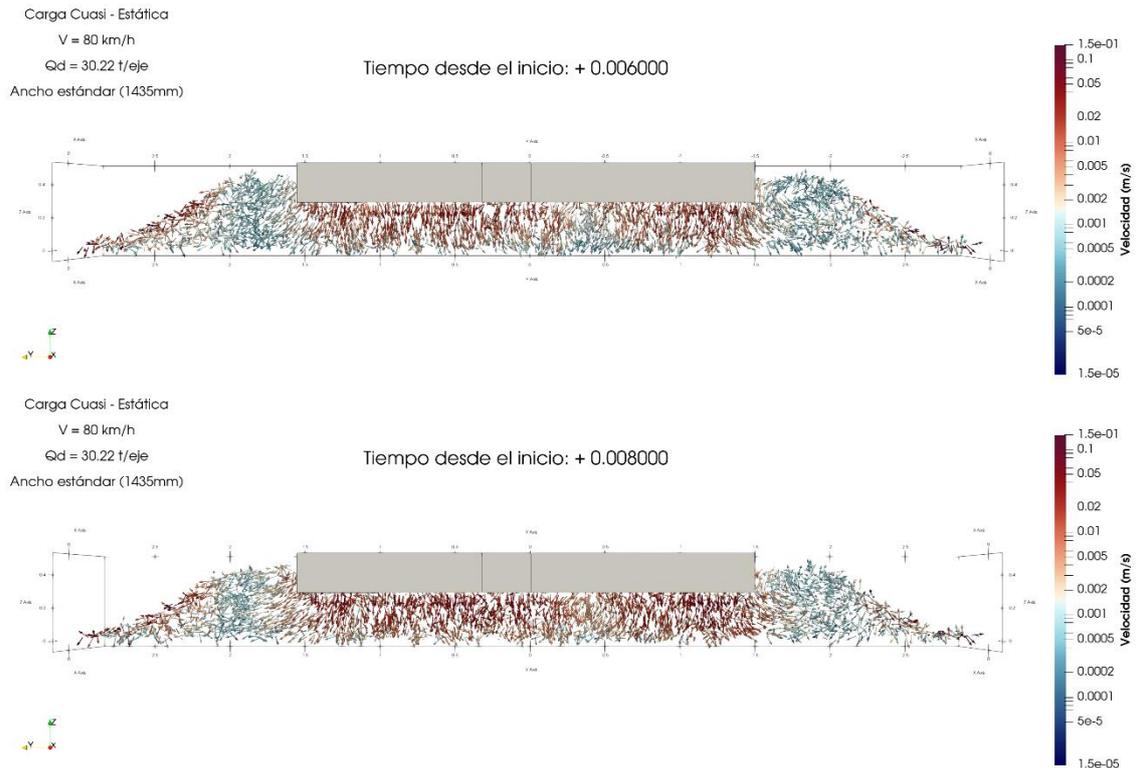


Ilustración 71. Representación en alzado de la secuencia de velocidades del balasto en la simulación de ancho estándar. (Elaboración propia)

Para poder observar mejor la velocidad del balasto se ha decidido por realizar un corte longitudinal a la capa de balasto por el centro para poder así apreciar el comportamiento de las partículas bajo la zona centro de la traviesa. Como se puede observar en la Ilustración 72, en la cual se muestra una comparativa de los dos anchos de vía existentes en el modelo, en la vía de ancho estándar solo las partículas más cercanas a la zona bajo la traviesa se ven influenciadas, sin embargo, en la vía de ancho estándar casi todas las partículas que conforman el balasto bajo traviesa se ven afectadas llegando a producirse que partículas que están en lo más bajo de la capa de balasto adquieran velocidad.

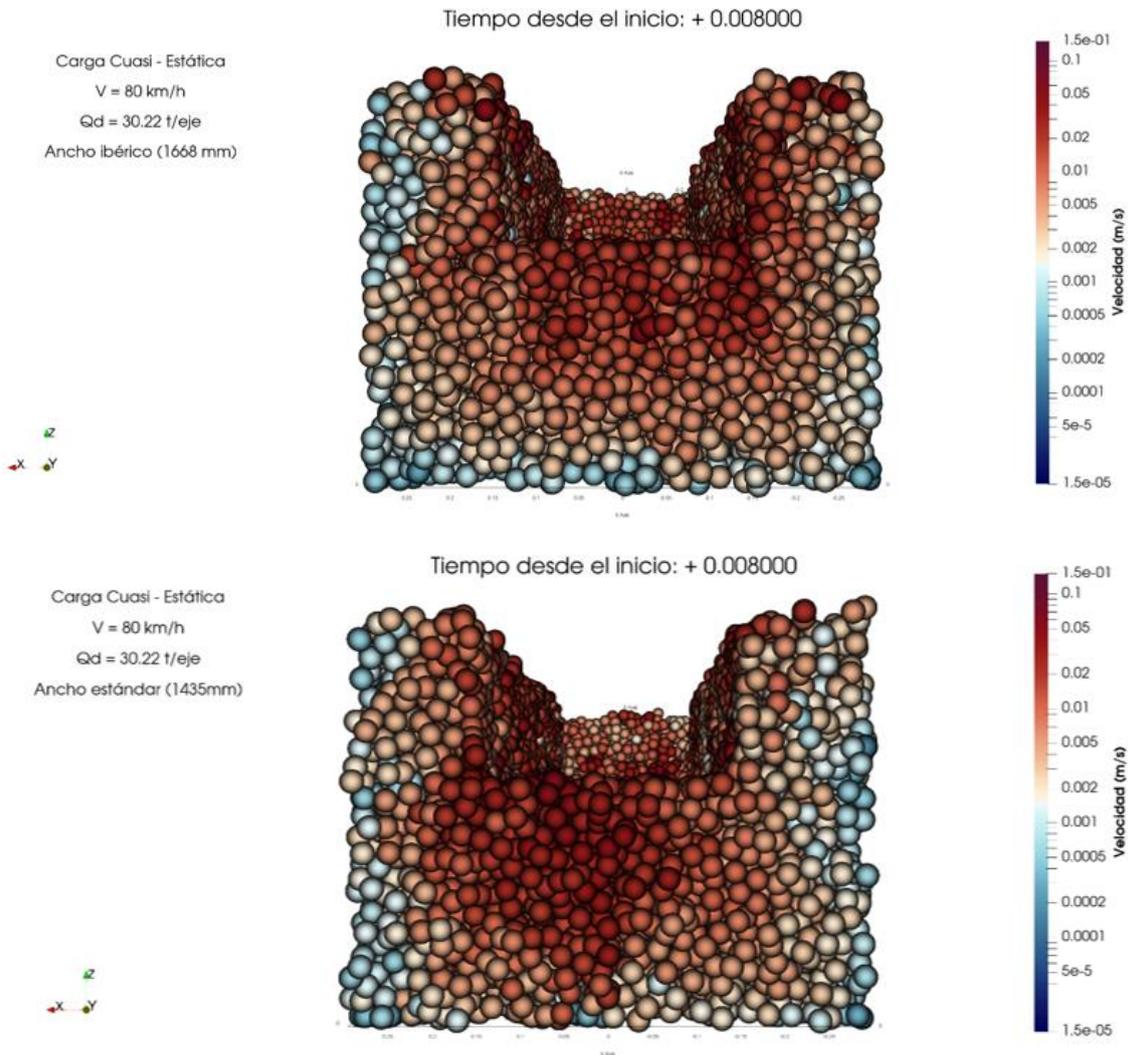


Ilustración 72. Representación de un corte longitudinal a la capa de balasto en donde se representan la velocidad de las partículas entre ambos anchos. (Elaboración propia)

6.4.2.4 Cadena de fuerzas

La representación de las cadenas de fuerzas permite saber cómo se transmite la fuerza normal en las partículas de balasto. Estudiar las cadenas de fuerzas permite determinar zonas en las cuales se generen concentraciones de tensiones las cuales puedan producir roturas en el balasto.

En la Ilustración 73 se muestra una comparativa en alzado de las cadenas de fuerzas tanto en la simulación de ancho ibérico como en la de ancho estándar. A grandes rasgos los resultados obtenidos en ambos anchos son bastantes similares con la única peculiaridad que en la vía de ancho estándar las cadenas de fuerzas llegan hasta la parte inferior de la capa de balasto mientras que en la simulación de la vía de ancho ibérico dichas cadenas, sobre todo en la zona central, no llegan a tocar la parte inferior de la capa de balasto. Esto principalmente es debido a que en la simulación de la vía de ancho estándar hay una zona la cual no se aprecian cadenas de

fuerzas. Esto es debido a que en esa zona el contacto entre la traviesa y el balasto es muy escaso o nulo lo cual hace que el resto de las partículas tengan que soportar una mayor carga y por tanto una mayor fuerza normal entre ellas.

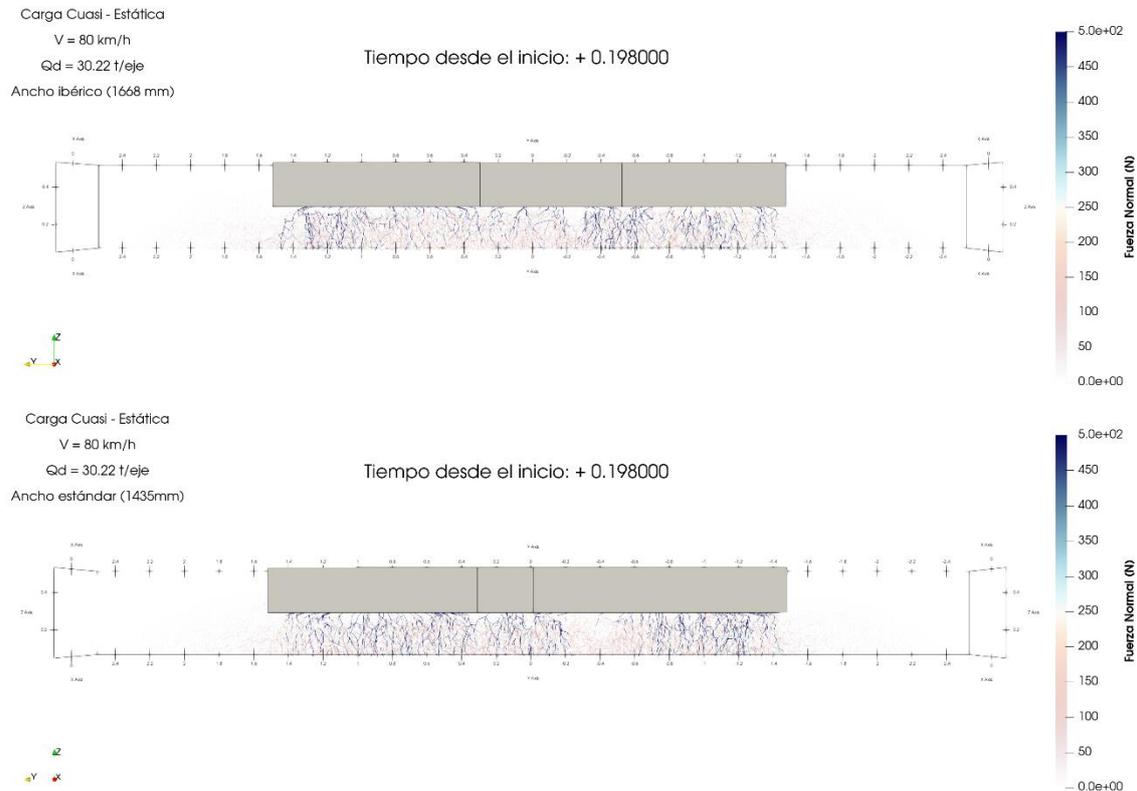
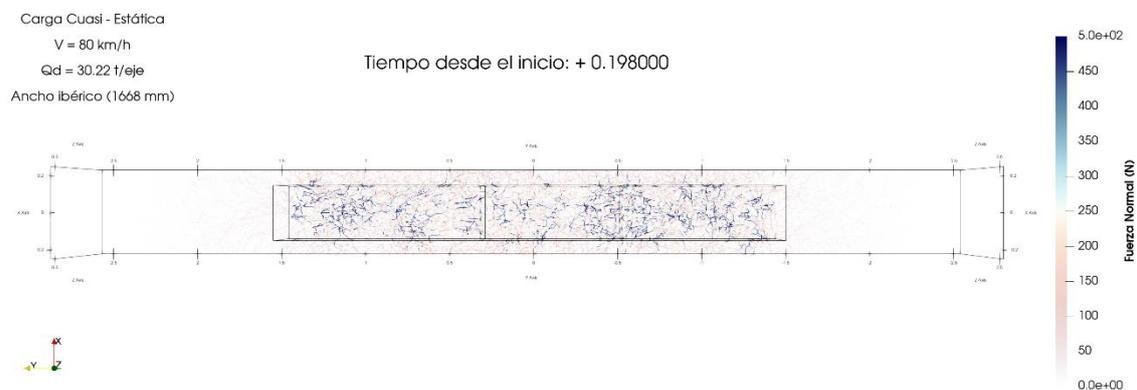


Ilustración 73. Comparativa de las cadenas de fuerzas normales entre ambos anchos tras la aplicación de una carga cuasi - estática. (Elaboración propia)

A continuación, se muestra en la Ilustración 74 una representación de las cadenas de fuerzas desde una vista en planta en la cual se representa la traviesa de manera transparente para poder apreciar las cadenas de fuerzas en la zona bajo traviesa. A simple vista los dos anchos resultan bastantes similares con la única peculiaridad de la zona en donde no hay cadenas visibles, la cual ya se ha comentado anteriormente.



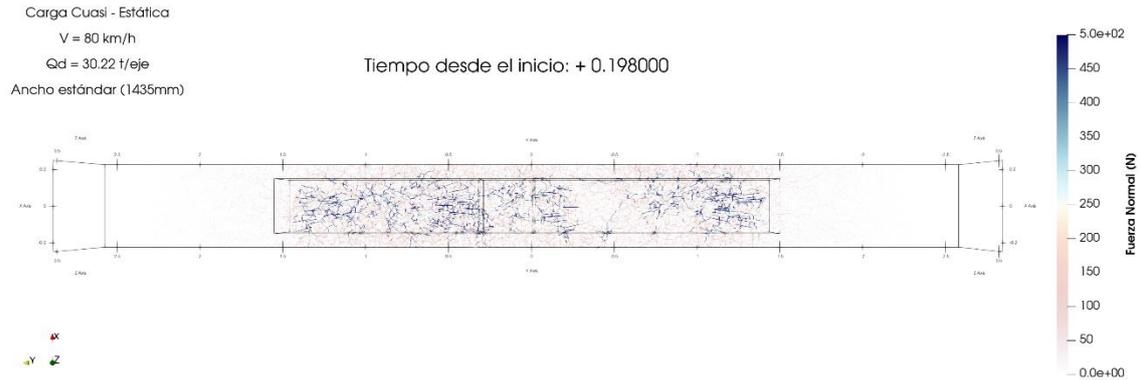


Ilustración 74. Comparativa en planta de las cadenas de fuerzas entre los dos anchos simulados. (Elaboración propia)

6.4.3 Caso 2: Velocidad de 160 km/h

A continuación, se ha procedido a realizar el análisis para una sollicitación cuasi – estática pero esta vez simulando una velocidad de circulación de 160 km/h. Cabe destacar que las diferencias en el comportamiento de la capa de balasto obtenidas a 80 km/h y a 160 km/h son bastante similares. El principal motivo por el cual se ha decidido realizar el análisis a esta velocidad es porque, a día de hoy, es la velocidad máxima admisible en la vía por normativa. Por lo tanto, si los defectos que se provoquen en el balasto a esta velocidad son admisibles la vía aguantara cualquier tipo de material rodante ya que el Serie 252 es el que mayor carga por eje tiene y está circulando a la velocidad máxima permitido en este tipo de vía.

6.4.3.1 Descenso de la traviesa

En la Ilustración 75 se ha graficado el descenso producido en la traviesa en función del ancho de vía por el cual circula el material móvil. Como se puede observar las diferencias en cuanto al descenso si se compara con la gráfica para una velocidad de circulación de 80 km/h no son muy grandes. La única diferencia considerable es ese pequeño aumento en el descenso de la traviesa que para una velocidad de 80 km/h era de unos 1,93 mm de media y para el caso de una velocidad de 160 km/h es de 2,05 mm. Como se ha podido observar, aunque se ha aumentado la velocidad al doble el descenso de la traviesa no es del doble ni mucho menos. Esto es debido a que la velocidad de paso de los trenes no es directamente proporcional al descenso de la traviesa y además hay otros factores influyentes como ya se vio en la fórmula de Eisenmann.

DESCENSO TRAVIESA ANCHO MIXTO

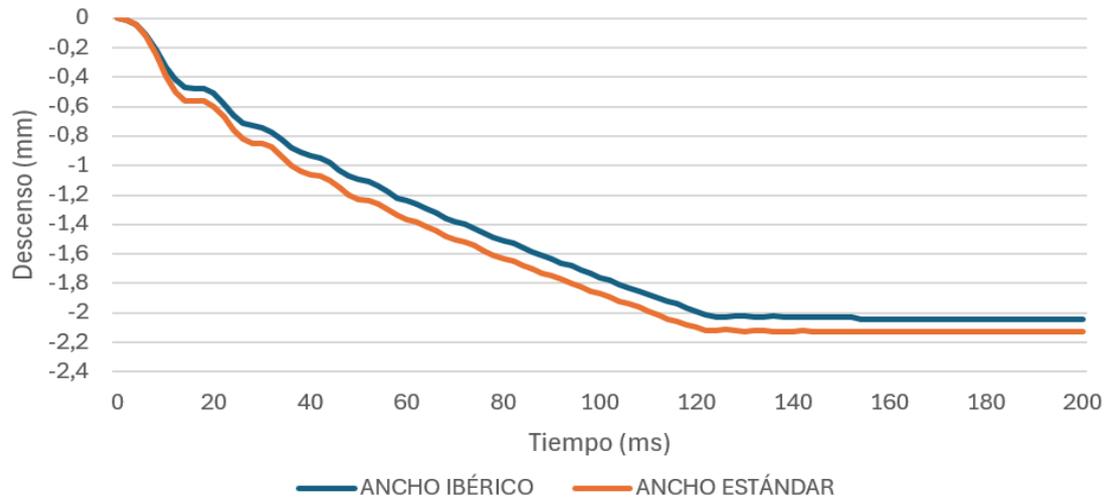


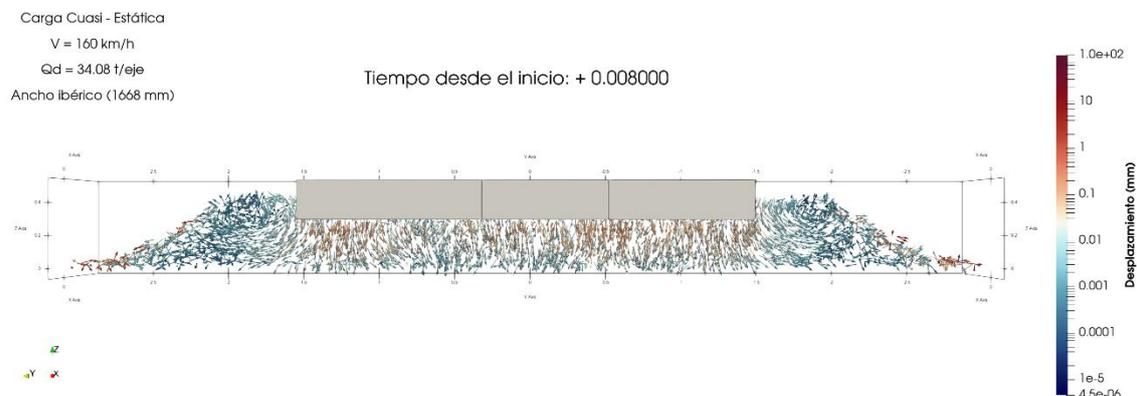
Ilustración 75. Gráfica representativa del descenso producido en la traviesa en función del ancho de vía. (Elaboración propia)

6.4.3.2 Desplazamiento de las partículas de balasto

Desplazamiento tridimensional

A grandes rasgos los desplazamientos de las partículas de balasto bajo la sollicitación de una carga cuasi – estática de 160 km/h es bastante similar a los resultados obtenidos a una velocidad de 80 km/h. La principal diferencia es la magnitud de los desplazamientos y la mayor cantidad de partículas involucradas en dicho desplazamiento.

En la Ilustración 76 se representa una secuencia de los desplazamientos de las partículas de la capa de balasto para la simulación de ancho ibérico. A lo largo de la secuencia se puede observar que a medida que avanza está el número de partículas que se desplaza va aumentando hasta llegar al tiempo 198 ms en el cual la carga aplicada es máxima y por ende los desplazamientos alcanzan su máxima magnitud.



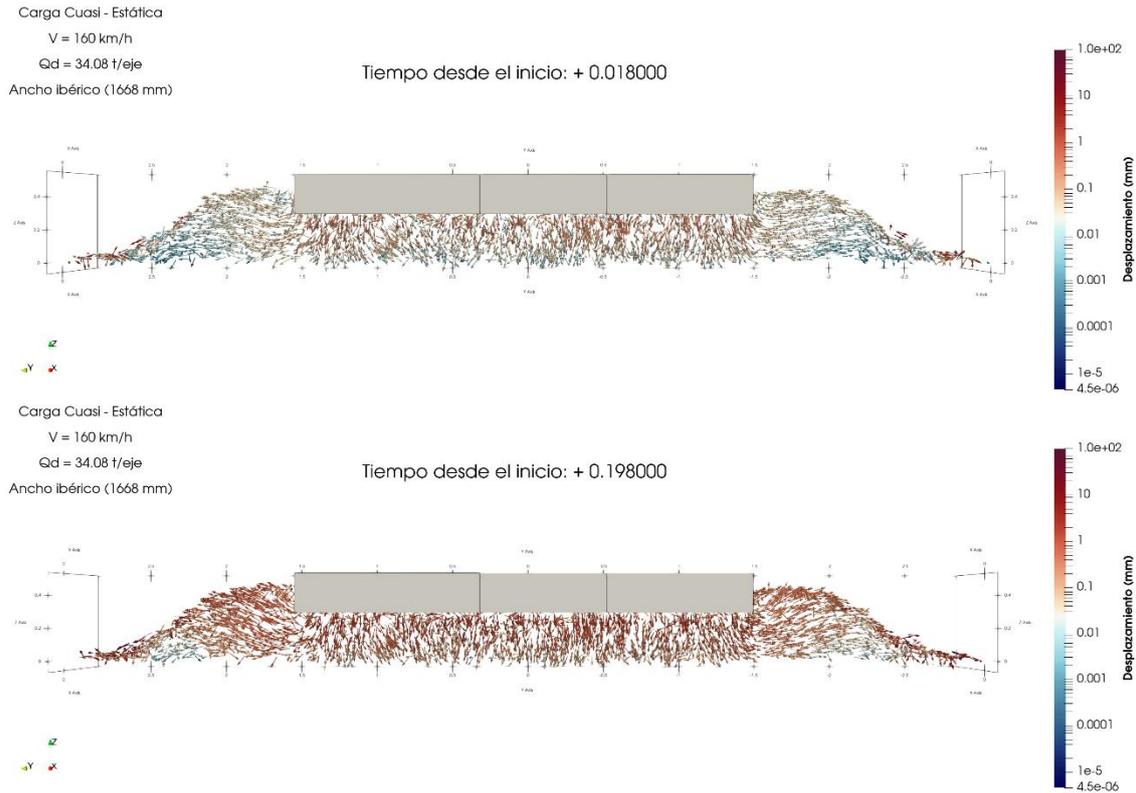
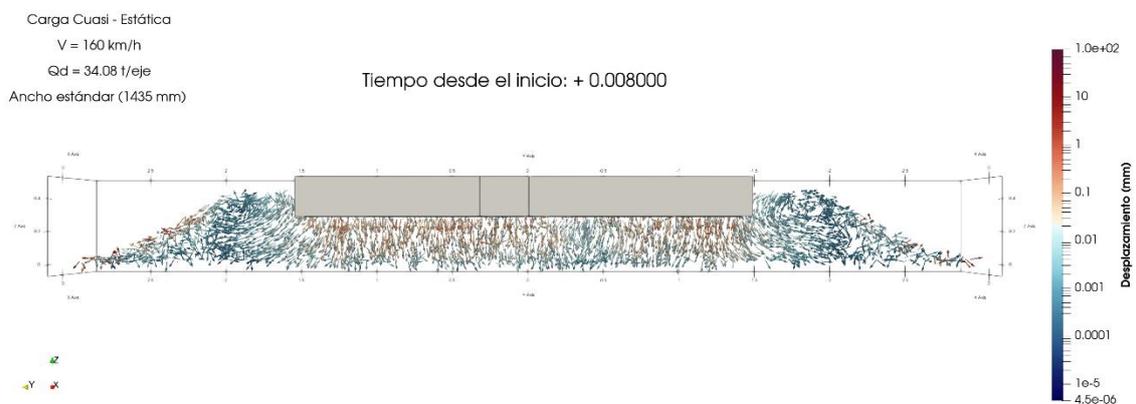


Ilustración 76. Secuencia de los desplazamientos tridimensionales de las partículas de balasto en el ancho ibérico. (Elaboración propia)

A continuación, en la Ilustración 77 se procede a representar la secuencia de los desplazamientos, pero esta vez para la vía de ancho estándar. Como se puede observar los desplazamientos de las partículas en este caso tienden a una mayor organización en comparación con la vía de ancho ibérico, es decir, en la vía de ancho estándar las partículas bajo la traviesa tienden al desplazamiento vertical mientras que en el caso de ancho ibérico no se aprecia este patrón y las partículas bajo traviesa se desplazan en todas las direcciones.



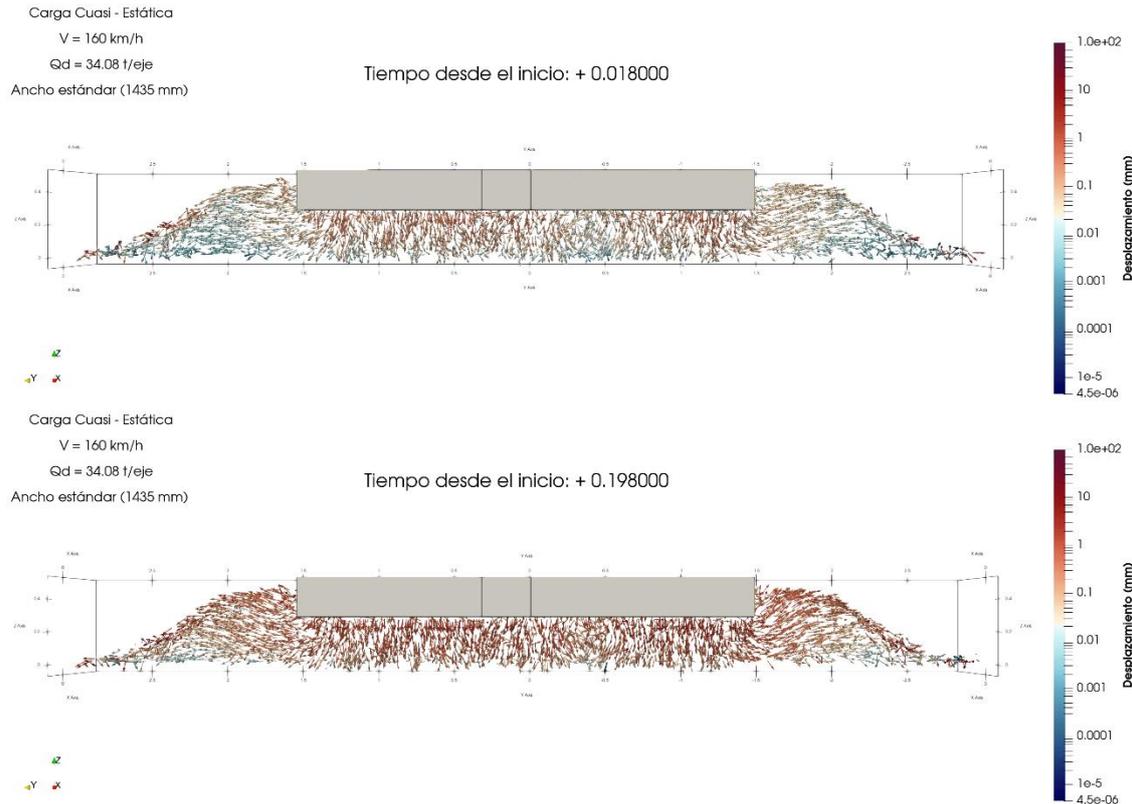
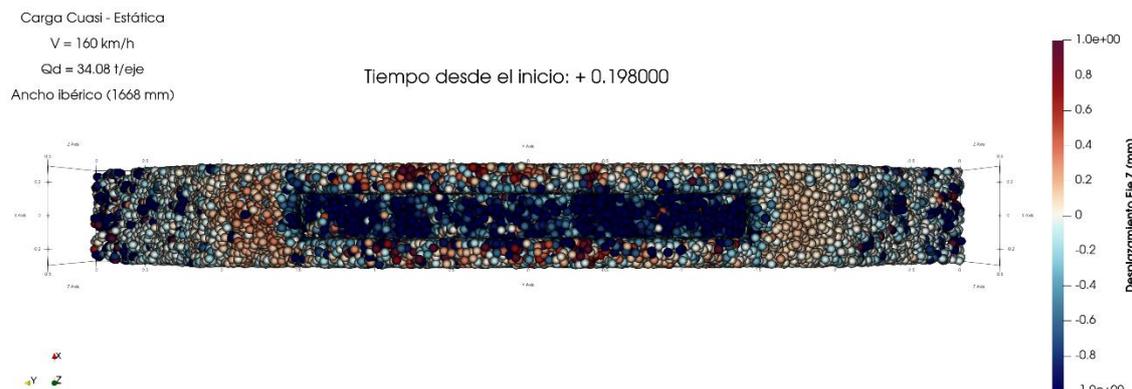


Ilustración 77. Proceso temporal de los desplazamientos de las partículas de balasto en la simulación de ancho estándar. (Elaboración propia)

Desplazamiento vertical Eje Z

En la Ilustración 78 se han representado las imágenes correspondientes a una vista en planta en la cual se comparan los desplazamientos verticales en la vía de ancho ibérico frente al ancho estándar. Como se puede observar en la imagen superior, correspondiente al ancho ibérico, el desplazamiento de las partículas de balasto es bastante homogéneo, obviando las partículas de los extremos de la capa de balasto los cuales cualquier tipo de coloración se debe al derrame de las partículas. Sin embargo, en la vía de ancho estándar se pueden observar zonas de gran coloración azul y zonas en las cuales no hay casi contacto entre la traviesa y el balasto, reflejando así una zona de partículas blanquinosa.



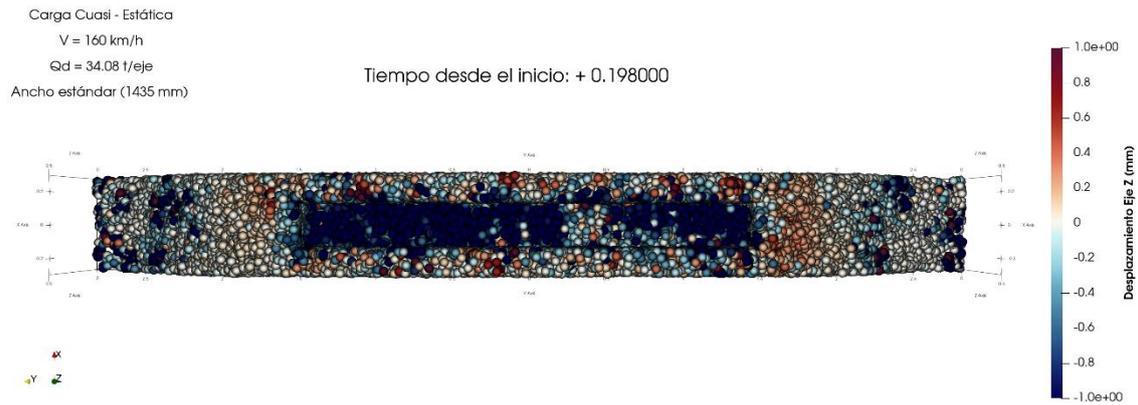
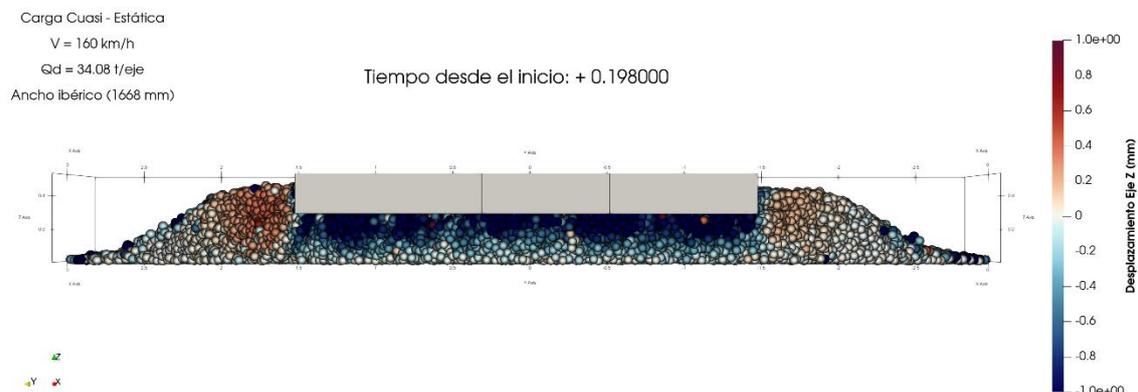


Ilustración 78. Representación en planta de los desplazamientos verticales entre ambos anchos. (Elaboración propia)

Acto seguido se ha procedido a representar en la Ilustración 79, el desplazamiento vertical de las partículas, pero en una vista en alzado. Esta vista permite observar hasta que profundidad en la capa de balasto se ven afectadas las partículas y por ende que partículas están recibiendo un desplazamiento significativo. A grandes rasgos los dos anchos presentan características similares en cuanto a los desplazamientos. Cabe resaltar esa zona de coloración roja en la hombrera izquierda de la vía de ancho ibérico. Esta coloración roja indica que las partículas de la hombrera están ascendiendo. Esto es debido a que como se pudo ver cuando se analizó el desplazamiento tridimensional, las partículas correspondientes a este ancho no seguían el patrón descendente vertical como si lo hacía la vía de ancho estándar y por ello se produce ese hinchamiento en la hombrera izquierda de la banqueta.



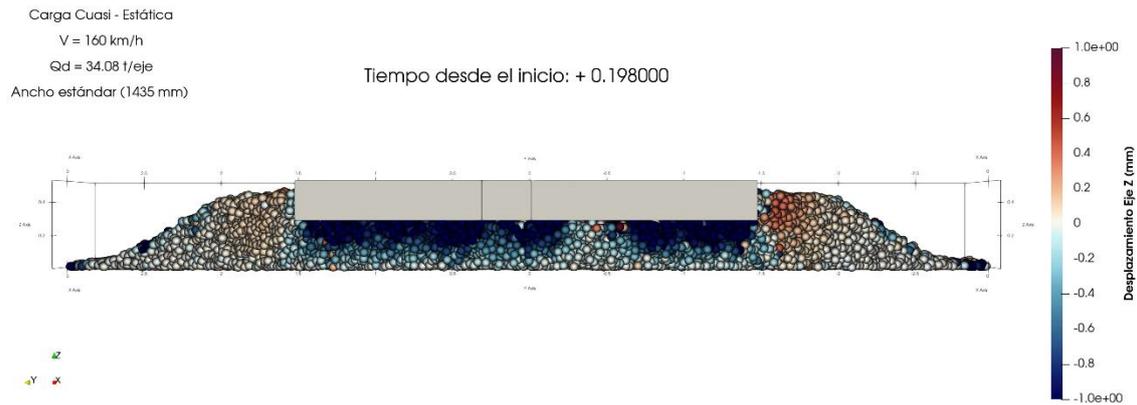
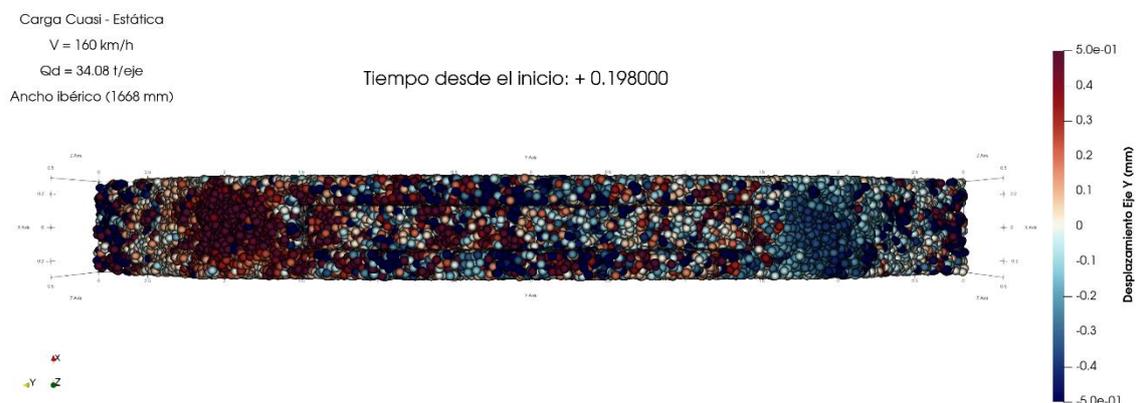


Ilustración 79. Vista frontal de los desplazamientos verticales de las partículas de balasto entre ambos anchos. (Elaboración propia)

Desplazamiento horizontal Eje Y

A continuación, se ha procedido a representar los desplazamientos laterales de las partículas de balasto debido a la acción de la carga cuasi – estática para una velocidad de 160 km/h. Se ha decidido realizar esta representación debido a que la componente horizontal de los desplazamientos juega un papel fundamental a la hora de la estabilidad de la vía, sobre todo de la estabilidad lateral.

Como se puede observar en la Ilustración 80, si se obvian las partículas de la zona bajo traviesas en los dos anchos las cuales no siguen un patrón definido, se puede observar que en ambos anchos hay una fuerte coloración, roja o azul dependiendo de la dirección de estas partículas, en las hombreras de la capa de balasto. La zona que más destaca es la hombrera izquierda en la vía de ancho ibérico en la cual toda la hombrera esta con una fuerte coloración roja.



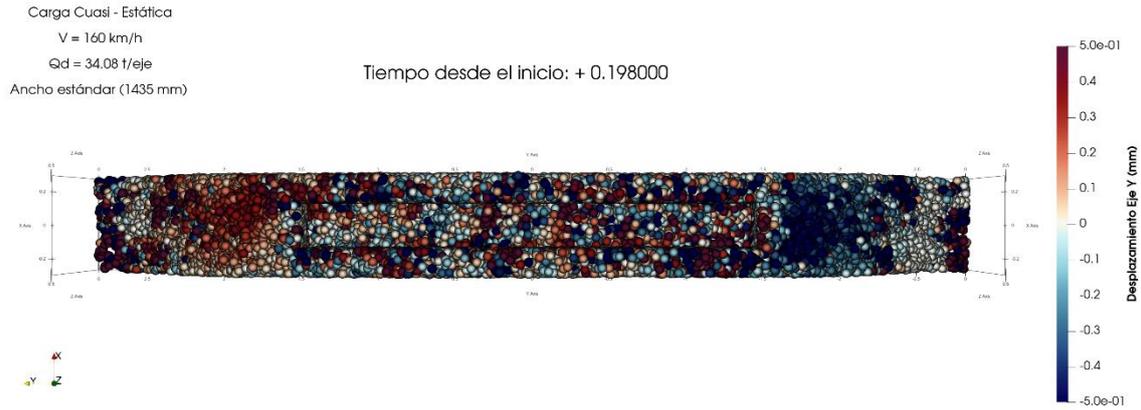


Ilustración 80. Vista en planta de los desplazamientos laterales del balasto en función del ancho de vía. (Elaboración propia)

En la Ilustración 81, se ha representado los desplazamientos de las partículas, pero desde una vista frontal. Dicha vista confirma lo observado anteriormente, el alto grado de partículas desplazado en las hombreras. Además, esta vista permite observar como el desplazamiento de las partículas es en todo el conjunto de la hombrera y no en la parte superior como parecía representar la ilustración anterior. En la vía es importante asegurar un desplazamiento razonable de las piedras de las hombreras ya que estas son las encargadas de asegurar la estabilidad lateral de la vía.

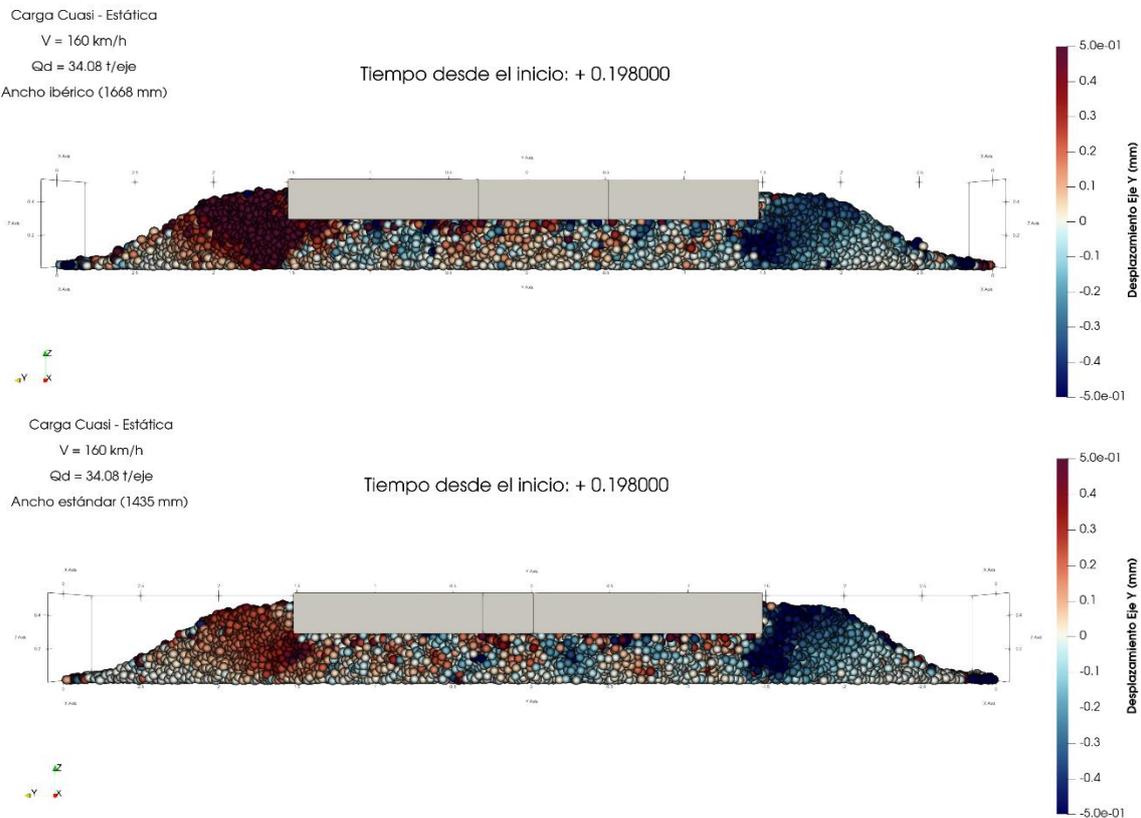


Ilustración 81. Vista frontal de los desplazamientos horizontales del balasto en ambos anchos. (Elaboración propia)

6.4.3.3 Velocidad de las partículas de balasto

En la Ilustración 82 se representa la velocidad de las partículas para la vía de ancho ibérico. Como ya se ha comentado anteriormente, para analizar la velocidad del balasto es necesario hacerlo en los primeros instantes de aplicación de la carga ya que es en el momento en el que mayor velocidad van a adquirir las partículas. Como se puede observar en la siguiente secuencia la velocidad de las partículas va aumentando conforme pasa el tiempo y cada vez más partículas adquieren una velocidad considerable como se puede observar en el tiempo 8 ms.

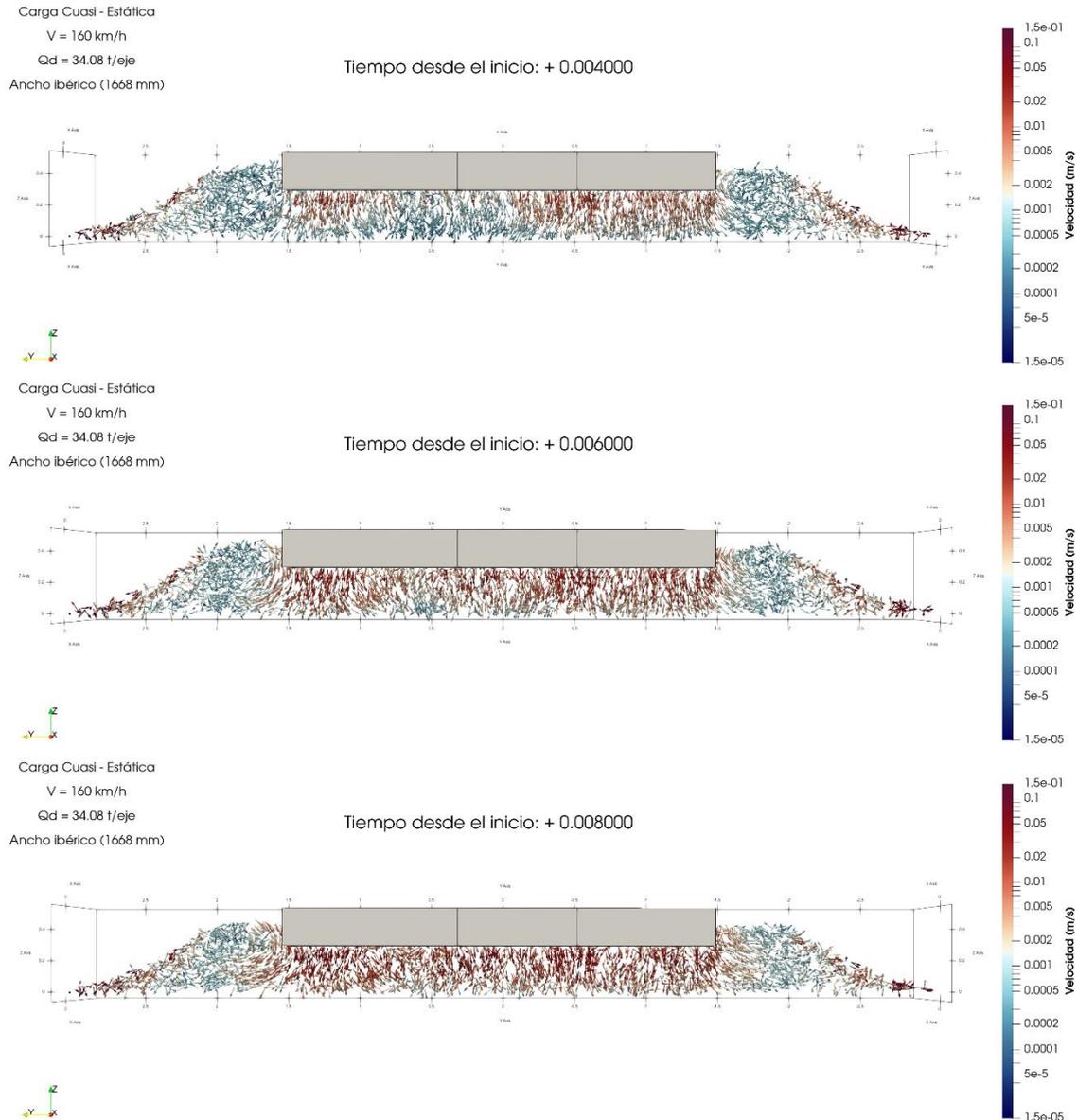


Ilustración 82. Secuencia de las velocidades de las partículas de balasto en la vía de ancho ibérico. (Elaboración propia)

Acto seguido se ha representado la velocidad, pero en este caso para la vía de ancho estándar. Como se puede observar en la Ilustración 83 los resultados obtenidos entre ambos anchos son bastantes parecidos, aunque en la imagen correspondiente a tiempo desde el inicio de 8 ms, en la vía de ancho estándar las partículas tienen una organización más uniforme en comparación de las partículas de la vía de ancho ibérico.

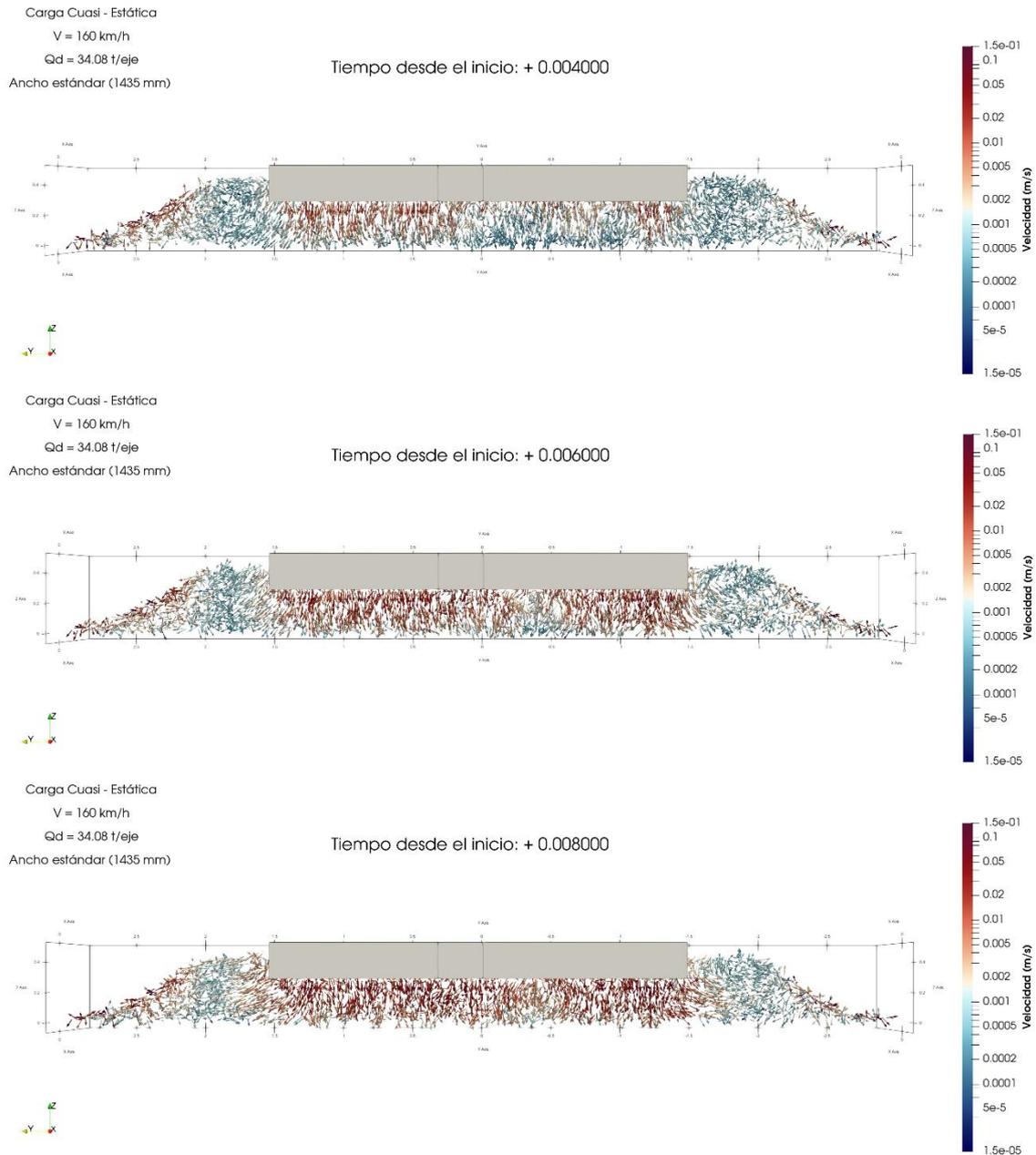


Ilustración 83. Secuencia de las velocidades del balasto en la vía de ancho estándar. (Elaboración propia)

En la Ilustración 84 se muestra una comparativa entre las velocidades en la capa de balasto. Para poder observar la velocidad de las partículas bajo la traviesa se ha optado por realizar un corte longitudinal a la capa de balasto por el centro de esta. Como se puede observar en la imagen superior, correspondiente a la vía de ancho ibérico, las partículas que adquieren un valor de velocidad considerable son las más cercanas a la zona de contacto con la traviesa. Sin embargo, en el ancho estándar una gran mayoría de las partículas bajo traviesa adquieren una velocidad considerable.

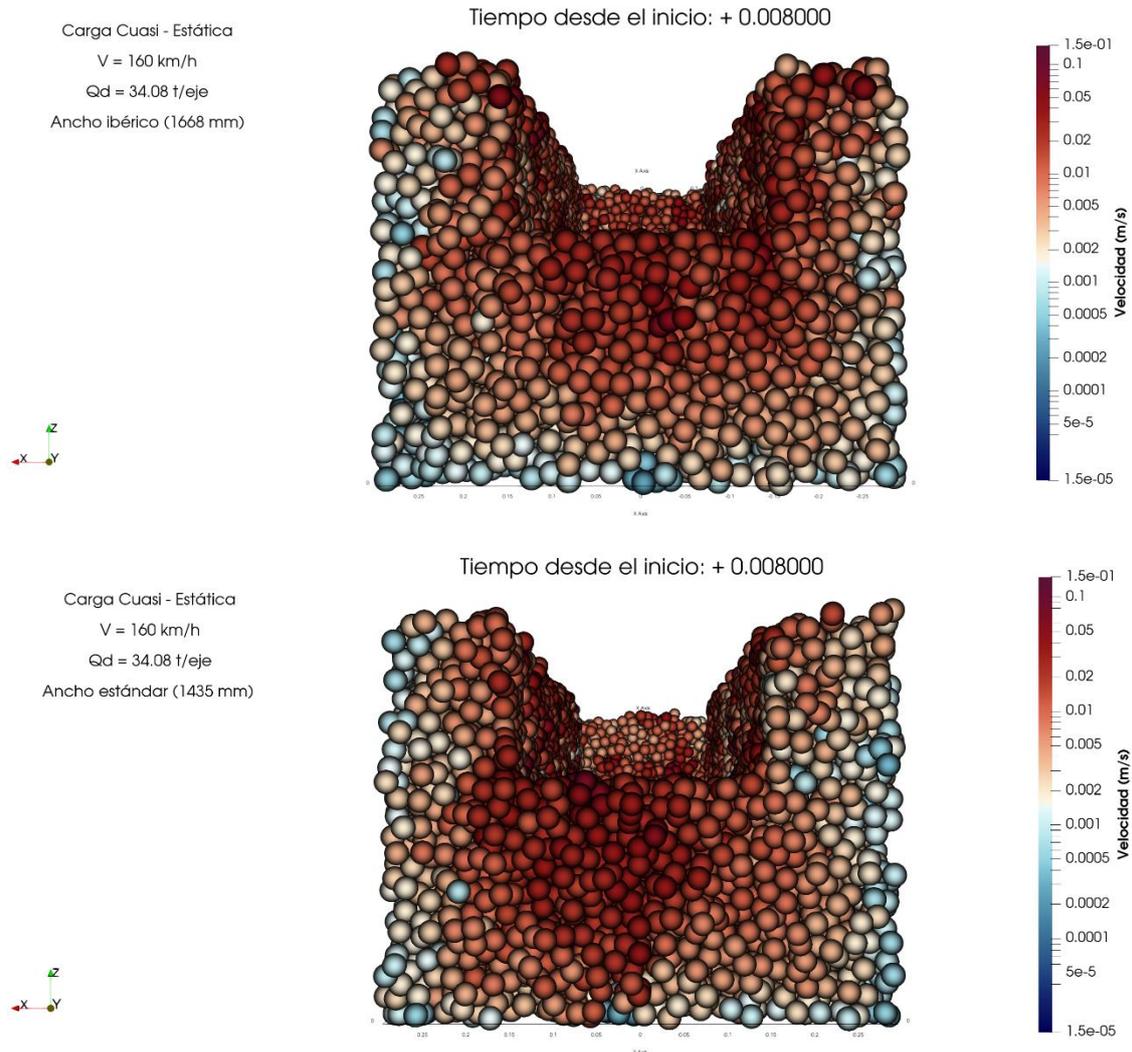


Ilustración 84. Comparativa de las velocidades del balasto en una sección longitudinal central en ambos anchos.
(Elaboración propia)

6.4.3.4 Cadena de fuerzas

En la Ilustración 85 se muestra una comparativa de los anchos mediante una vista frontal de las cadenas de fuerzas normales ocasionadas en la capa de balasto por una carga cuasi – estática a una velocidad de 160 km/h. Como se puede observar ambas cadenas de fuerzas son bastantes similares. Las únicas diferencias visibles son que en la vía de ancho ibérico algunas cadenas de fuerzas no consiguen tocar la zona inferior de la capa de balasto y en la vía de ancho estándar hay una zona en la cual no se aprecian cadenas de fuerza debido a que el contacto entre traviesa y balasto es casi nulo.

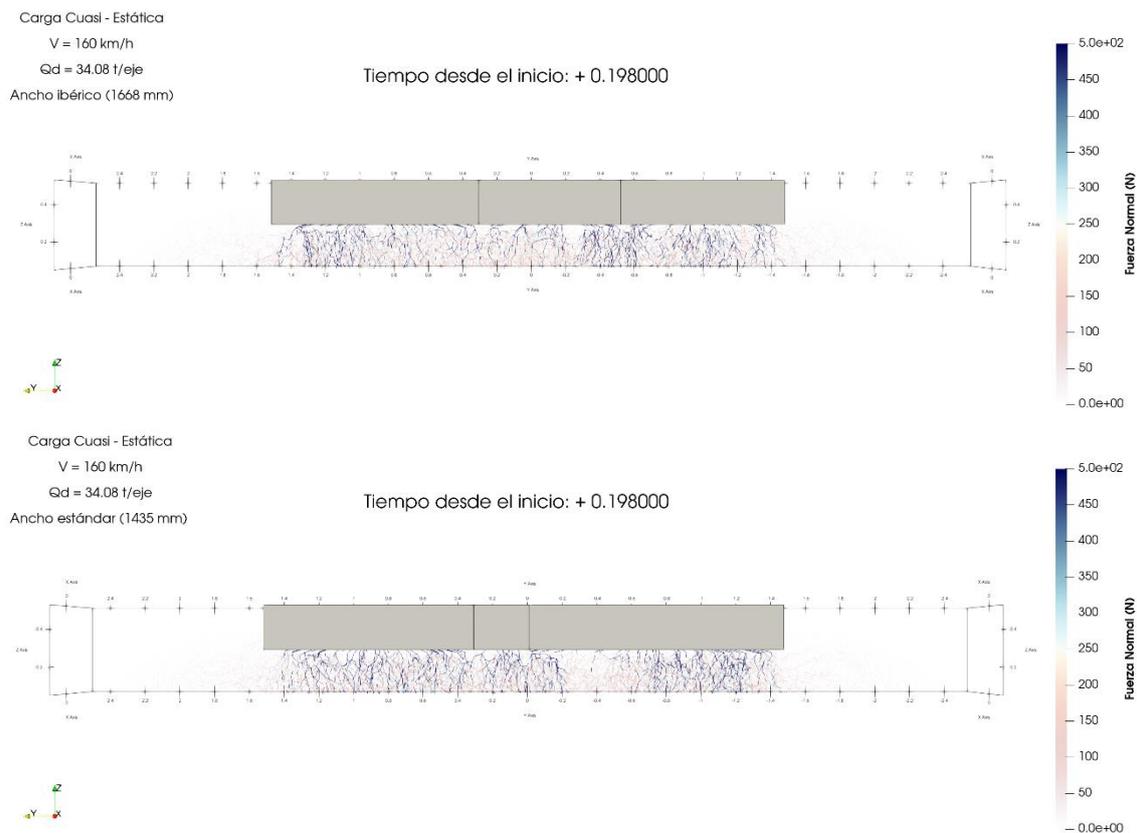


Ilustración 85. Representación de las cadenas de fuerzas normales mediante una vista frontal en ambos anchos. (Elaboración propia)

Acto seguido se representan en la Ilustración 86 las cadenas de fuerzas desde una vista en planta la cual nos permite observar el comportamiento de dichas cadenas en la zona bajo traviesa. Además, realizar una vista en planta ayuda a reafirmar las diferencias observadas con la vista frontal.

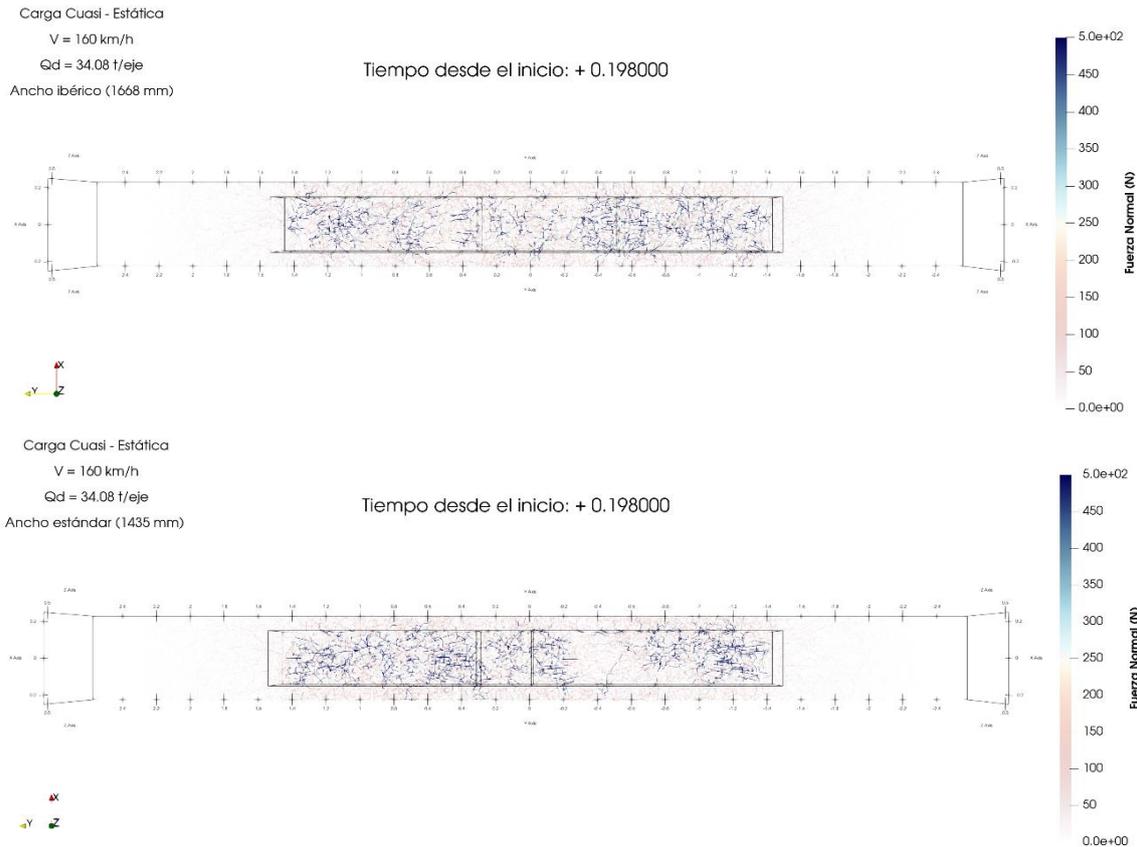


Ilustración 86. Representación de las cadenas de fuerzas normales mediante una vista en planta en ambos anchos. (Elaboración propia)

6.5 Solicitación dinámica

6.5.1 Caracterización

La principal finalidad de realizar esta solicitud es acercarse a los efectos reales generados por el paso de los trenes en el tramo ferroviario Valencia - Sagunto. Para ello se implementará una carga variable en la traviesa, la cual varíe en función de la distancia del eje del tren a dicha traviesa. Esto se llevará a cabo según lo preestablecido en el apartado 5.4.5 "Carga dinámica". Para el estudio de la sollicitación dinámica se han considerado dos tipos de simulaciones. La simulación 1 la cual consta de dos partes: simular el paso de un solo eje y simular la composición completa de la Serie 447 ambos por la vía de ancho ibérico, ya que en España circulan por este tipo de vía. La simulación 2 la cual está dividida en dos partes: simular el paso de un solo eje y simular la composición completa de la Serie 130 ambos por la vía de ancho estándar ya que este tipo de material rodante circula por este tipo de vía. Para ello se ha optado por realizar ambas simulaciones a la velocidad máxima de circulación de estos vehículos, la cual es 120 km/h y 250 km/h, respectivamente. Si bien es cierto que en el tramo ferroviario de Valencia-Sagunto la velocidad máxima de circulación está limitada a 160 km/h por normativa, la Serie 130, por sus características técnicas podría circular a una velocidad más elevada.

Por lo tanto, se ha optado por realizar la simulación a su velocidad máxima ya que se espera que en un tiempo no muy lejano se amplie el límite de velocidad en esta vía. En los dos escenarios se ha tenido en cuenta la carga de cada eje mayorada por el criterio de Eisenmann, con el fin de evaluar los impactos de la dinámica vertical en la vía, analizando así la situación más desfavorable para la infraestructura.

6.5.2 Caso 1: Serie 447

6.5.2.1 Descenso de la traviesa

Eje simple

El comportamiento que presenta una traviesa al ser sometido a una carga dinámica dista mucho de lo que pasa si se someten a cargas estáticas o cuasi – estáticas. Esto se debe a que a diferencia de solicitaciones estáticas o cuasi – estáticas en donde la traviesa recibe la carga de forma casi instantánea, en caso de solicitaciones dinámicas el proceso es más lento, ya que influye el paso del tren. Además, en solicitaciones estáticas o cuasi – estáticas la carga máxima que soporta la traviesa dura más tiempo en comparación con casos dinámicos en donde solo se soportara la carga máxima durante un periodo corto de tiempo.

En la Ilustración 87 se representa en forma de gráfica el descenso producido en la traviesa tras el paso de un eje motor simple de la Serie 447 para una velocidad de circulación de 120 km/h. Debido al factor de mayoración según lo establecido por Eisenmann el valor de carga actuante es de 20,26 t/eje. Si se observa el descenso de la traviesa se puede obtener las siguientes características:

- El descenso producido en la traviesa no sigue una trayectoria uniforme ni constante a lo largo del tiempo, aunque la carga sí cambia de manera lineal. Esto se debe a la elasticidad de la banqueta de balasto y a la variación en el contacto con distintas partículas a lo largo del tiempo.
- Todo el proceso de carga y descarga de la traviesa se realiza en tan solo 0,12 segundos obteniéndose un descenso de 0,860 mm.

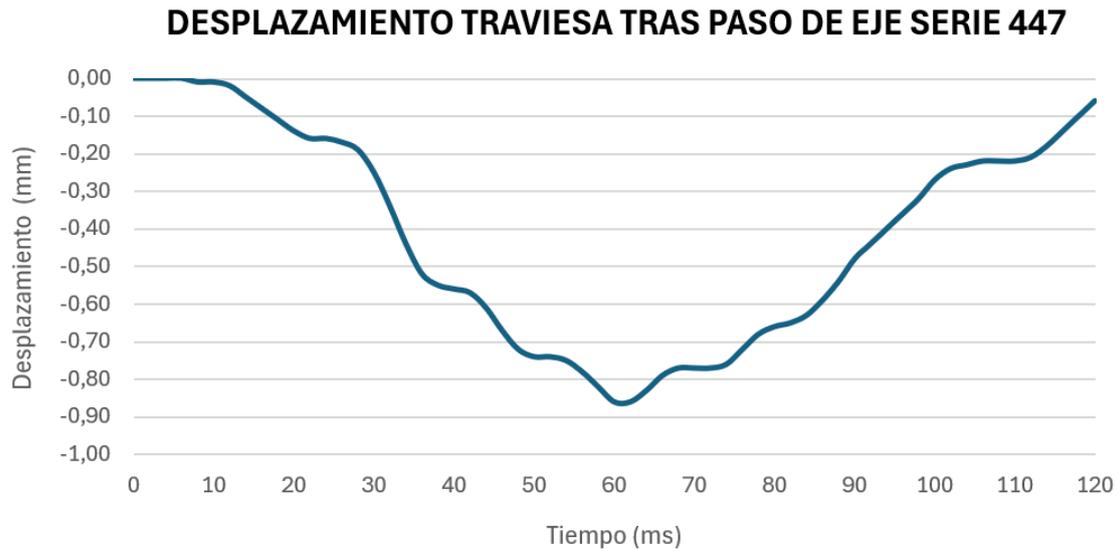


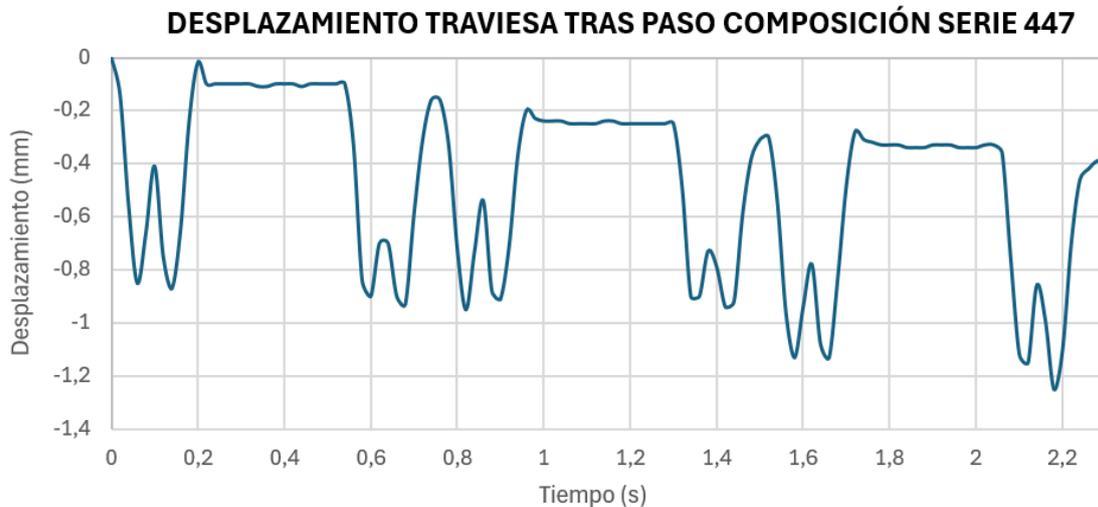
Ilustración 87. Desplazamiento producido en la traviesa tras el paso de un eje simple de la Serie 447. (Elaboración propia)

Serie 447 completa

Cuando se considera el avance de una unidad completa de la Serie 447, como el representado en la Ilustración 88, se observa la deformación y alteración de la capa de balasto y las superposiciones entre las cargas de los ejes en un mismo bogie. En la ilustración se puede notar la disparidad entre la disminución causada por los ejes motores y los ejes más ligeros de los remolques del vehículo intermedio. Los descensos que experimenta la traviesa son comparables a los obtenidos tras el paso de un eje simple con la única diferencia de que el descenso de la traviesa aumenta al tratarse de varios ejes en vez de uno solo. Además, se pueden observar ciertas zonas en donde la traviesa no puede recuperar su posición inicial debido a la cercanía de los ejes de un mismo bogie y por tanto se da ese fenómeno de “patrón de sierra”. Además de la gráfica proporcionada se pueden sacar la siguiente información:

- Tras el paso de los bogies de la composición se producen una serie de asentamientos en la traviesa que van aumentando con el paso de los coches. Este tipo de consolidación de la vía es similar a la fase inicial de una vía ferroviaria después de ser construida, donde el tráfico prematuro causa asentamientos característicos tanto de la traviesa como de capa de balasto. Por ello, en vías de nueva construcción antes de la puesta en servicio es necesario usar estabilizadoras de vía las cuales permitan una consolidación rápida de esta para que los trenes puedan circular a la velocidad de servicio sin esperar a que la vía se vaya consolidando con el paso del material rodante.

- La similitud en los ejes de una composición no asegura que la traviesa tenga el mismo desempeño que en situaciones previas, lo cual demuestra una vez más el comportamiento heterogéneo de la capa de balasto.



*Ilustración 88. Desplazamiento producido en una traviesa tras el paso de la composición completa de la Serie 447.
(Elaboración propia)*

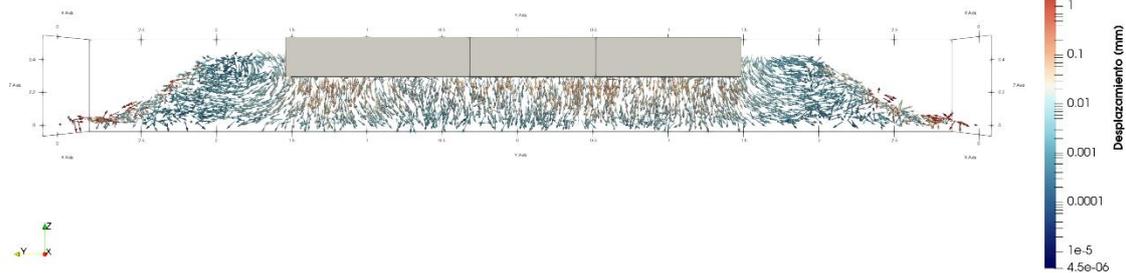
6.5.2.2 Desplazamiento de las partículas de balasto

Eje simple

Durante el proceso de aumento de carga sobre la traviesa, es decir, mientras el eje se está aproximando, los desplazamientos observados son similares a los que se observaban en la sollicitación estática, aunque el valor de carga no fuese el mismo. La Ilustración 89 muestra que en la zona bajo la traviesa los desplazamientos son predominantemente verticales, oscilando entre 0,05 mm y 1 mm, y siendo mayores en las áreas más cercanas a la base de la traviesa. En las hombreras se observa el desprendimiento típico de las partículas más externas del talud, mientras que en la zona interna las partículas se mueven hacia los lados, empujadas por el descenso del balasto bajo la traviesa. Como se puede apreciar, en esta fase no se ha producido aún hinchamiento en las hombreras de la capa de balasto.

Carga Dinámica
V = 120 km/h
Qd = 20.26 t/eje
Ancho ibérico (1668 mm)

Tiempo desde el inicio: + 0.020000



Carga Dinámica
V = 120 km/h
Qd = 20.26 t/eje
Ancho ibérico (1668 mm)

Tiempo desde el inicio: + 0.030000

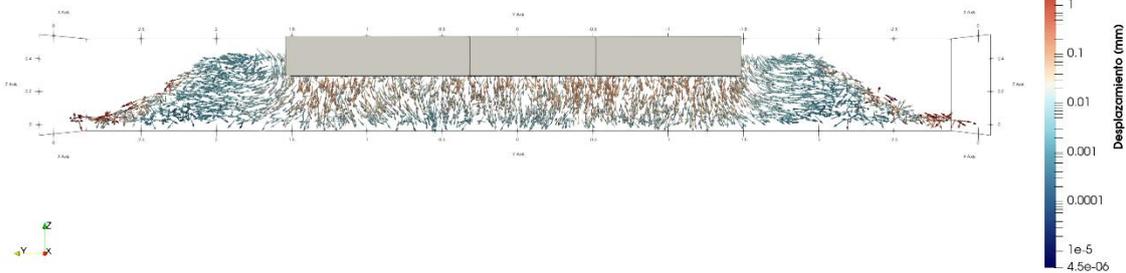


Ilustración 89. Desplazamiento tridimensional de las partículas de balasto durante el aumento de carga sobre la traviesa. (Elaboración propia)

La Ilustración 90 muestra el momento en que el eje está totalmente encima de la traviesa, lo que implica que tanto la traviesa como el balasto están soportando la carga máxima. En este punto, la mayoría de la zona bajo la traviesa ha experimentado desplazamientos superiores a 0,1 mm, llegando incluso bastantes partículas a alcanzar valores de 1 mm, lo que provoca un desplazamiento lateral significativo de las partículas en las hombreras y explica el hundimiento de la traviesa. Cabe destacar que las áreas con menor movilización son las partes más bajas de las hombreras.

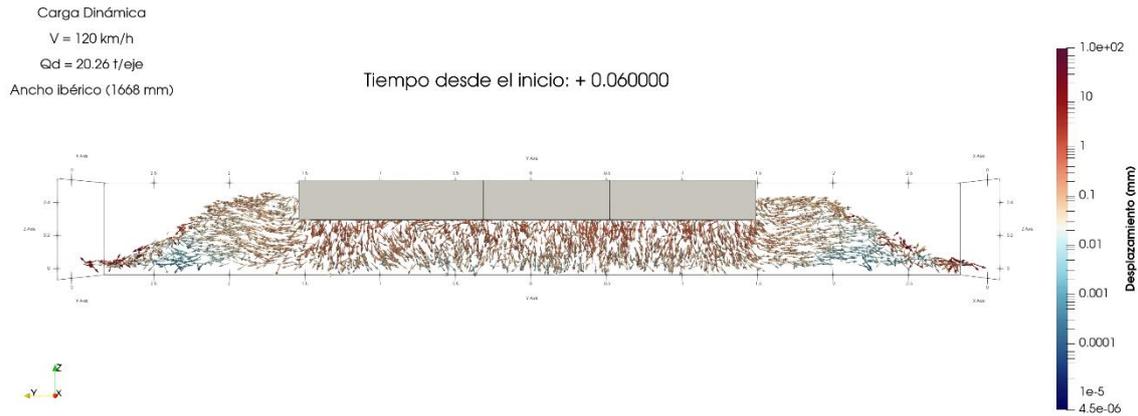


Ilustración 90. Desplazamiento tridimensional de las partículas de balasto en el momento de mayor carga en la traviesa. (Elaboración propia)

A continuación, en la Ilustración 91 se representa la evolución de los desplazamientos una vez que el eje ha pasado por la traviesa y la carga comienza a disminuir. En esta ilustración se puede ver cómo las partículas empiezan a volver a una posición similar a la inicial, ya que la magnitud del desplazamiento va disminuyendo conforme el eje se va alejando de la traviesa

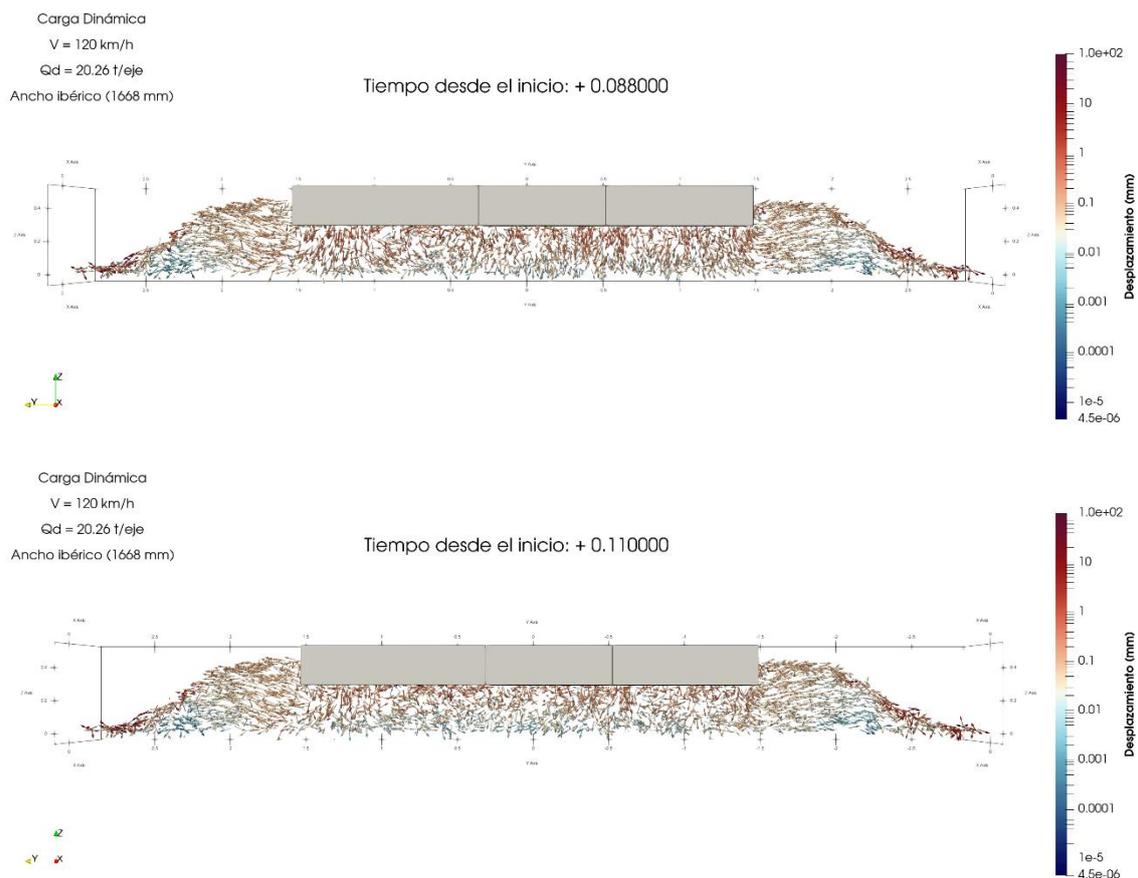


Ilustración 91. Desplazamiento tridimensional de las partículas de balasto durante el proceso de descarga de la traviesa. (Elaboración propia)

Este proceso se completa en el momento en que la traviesa ya no está sometida a ninguna carga, como se muestra en la Ilustración 92. En este punto final, se puede observar como uno de los efectos del paso del eje del tren es el desprendimiento de las piedras en la superficie de los taludes. Además, se puede apreciar una deformación permanente en la banqueta, ya que no todas las partículas han regresado a su posición original. Las hombreras son las zonas que muestran una dirección clara de deformación, lo que indica que gran parte de la deformación plástica de la vía se debe al desplazamiento lateral del balasto, que no logra recuperar su posición inicial por completo. También, se observa que la zona central situada en la parte inferior de la capa de balasto no presenta casi desplazamientos lo que hace indicar que el efecto de la carga no alcanza toda la altura de la capa de balasto.

En la zona bajo la traviesa, los desplazamientos alcanzan su mayor magnitud en el estado final, con valores que varían entre 0,5 mm y 1 mm, sin considerar las partículas desprendidas de los taludes. A pesar de esto, no se observa una dirección preferente de deformación, lo que sugiere que se ha producido una reorganización de las partículas que no ha tenido un gran impacto en la deformación de la capa de balasto.

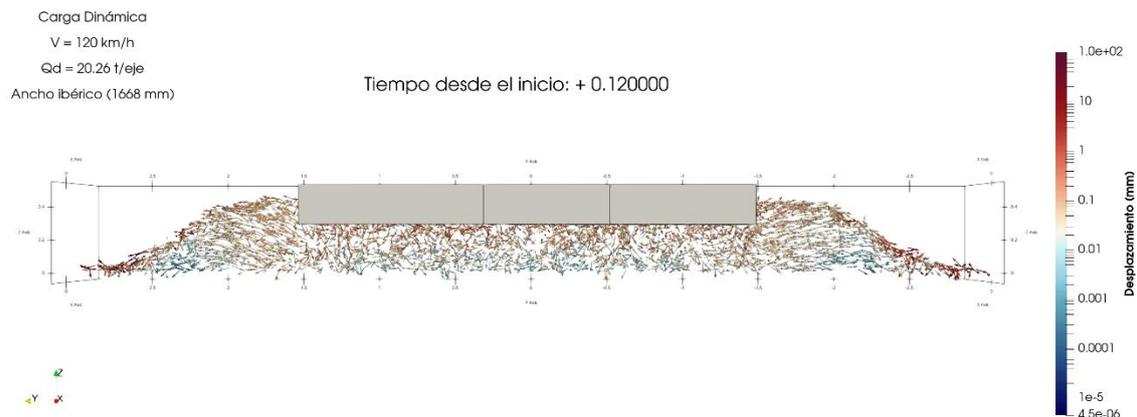
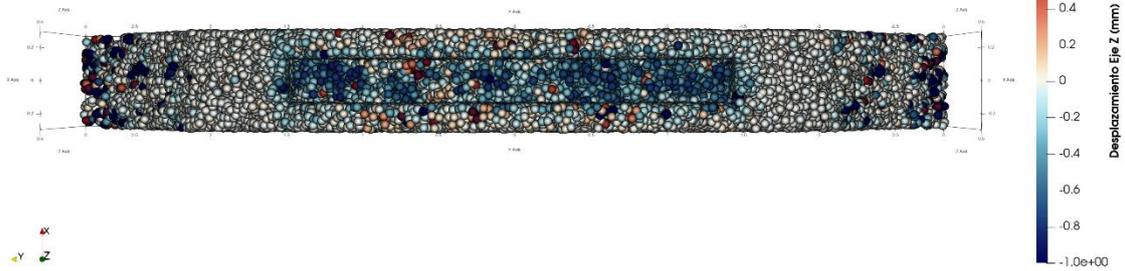


Ilustración 92. Desplazamiento tridimensional de las partículas de balasto tras finalizar la descarga de la traviesa. (Elaboración propia)

En la Ilustración 93, se muestran los desplazamientos verticales, tanto en planta como en alzado, de las partículas de balasto en el momento de mayor aplicación de la carga. Se observa que los desplazamientos más significativos se concentran en la zona bajo la traviesa, similar a lo que ocurre en otras situaciones de carga. Además, se puede apreciar que los desplazamientos ascendentes son prácticamente inexistentes o poco significativos lo cual hace indicar que la mayoría del balasto en el momento de máxima aplicación de la carga está descendiendo.

Carga Dinámica
V = 120 km/h
Qd = 20.26 t/eje
Ancho ibérico (1668 mm)

Tiempo desde el inicio: + 0.060000



Carga Dinámica
V = 120 km/h
Qd = 20.26 t/eje
Ancho ibérico (1668 mm)

Tiempo desde el inicio: + 0.060000

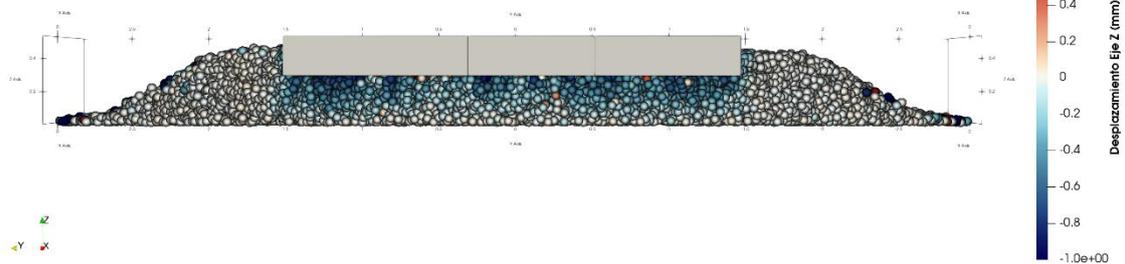
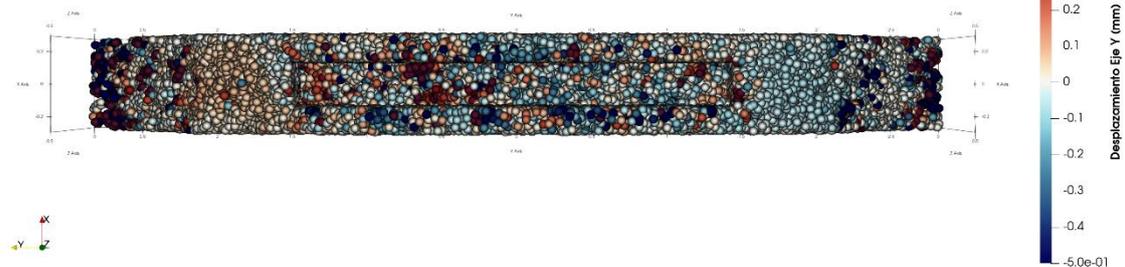


Ilustración 93. Desplazamiento vertical de las partículas de balasto en el momento de máxima aplicación de la carga para un eje simple de la Serie 447. (Elaboración propia)

A continuación, en la Ilustración 94 se representa las vistas en planta y alzado de los desplazamientos horizontales de las partículas de balasto. Como se puede apreciar las partículas no siguen un patrón definido en cuanto al desplazamiento horizontal. No obstante, en la vista en alzado se puede apreciar dos zonas, una a cada extremo de la traviesa, en donde se aprecian unas pequeñas zonas con coloración roja en la parte izquierda y azul en la parte derecha las cuales hacen indicar que está habiendo un desplazamiento lateral de esas partículas debido a los efectos producidos por el balasto bajo traviesa.

Carga Dinámica
V = 120 km/h
Qd = 20.26 t/eje
Ancho ibérico (1668 mm)

Tiempo desde el inicio: + 0.060000



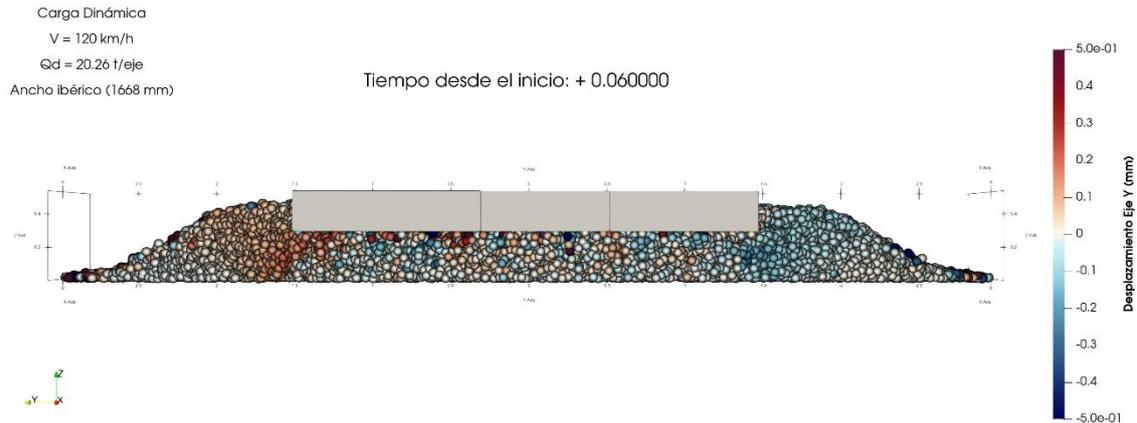
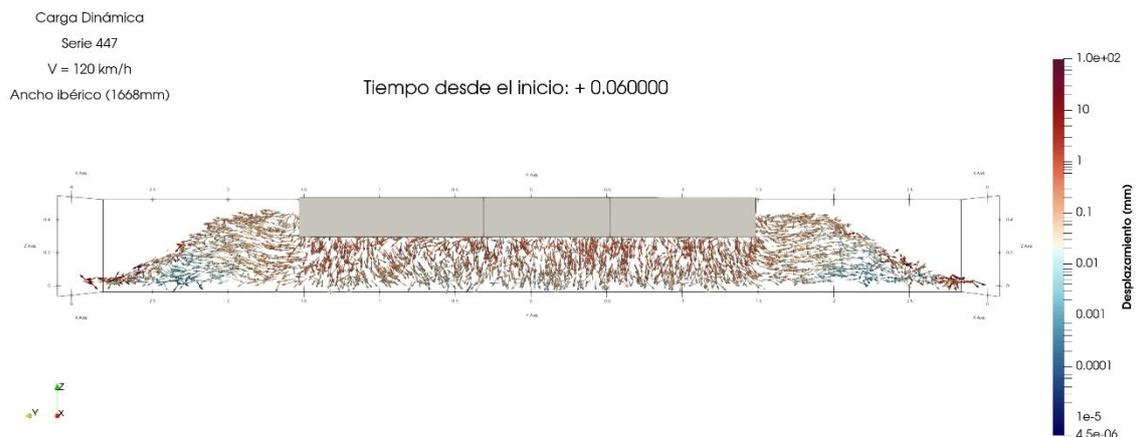


Ilustración 94. Desplazamiento horizontal de las partículas de balasto en el momento de máxima aplicación de la carga para un eje simple de la Serie 447. (Elaboración propia)

Serie 447 completa

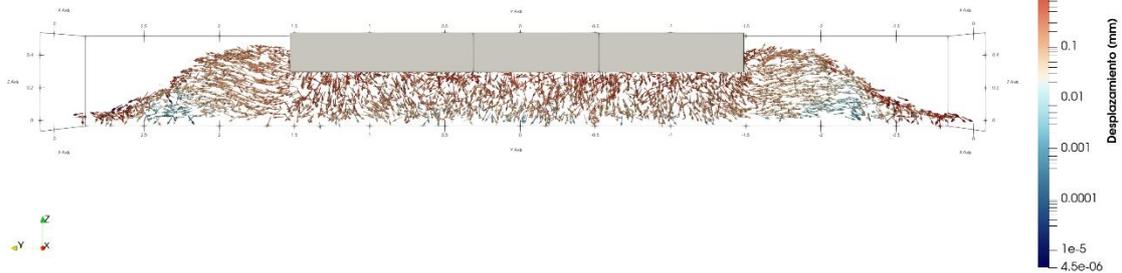
El comportamiento de la capa de balasto al paso de los ejes de cada bogie es similar al observado con un eje único, salvo por las diferencias en las repeticiones y frecuencias de las cargas y descargas. Lo más destacable en términos de desplazamientos para la unidad completa es el estado de deformación que se presenta tras el paso de los diferentes ejes del tren, lo que permite analizar los asientos permanentes en la vía.

En la Ilustración 95 se muestran los desplazamientos tridimensionales de las partículas de balasto en una serie de momentos singulares desde el punto de vista del estudio del balasto. En la secuencia de ilustraciones se puede observar como a medida que van pasando los ejes del tren las partículas de balasto van descendiendo cada vez más lo cual repercute directamente en el hinchamiento de las hombreras.



Carga Dinámica
Serie 447
V = 120 km/h
Ancho ibérico (1668mm)

Tiempo desde el inicio: + 0.820000



Carga Dinámica
Serie 447
V = 120 km/h
Ancho ibérico (1668mm)

Tiempo desde el inicio: + 1.580000

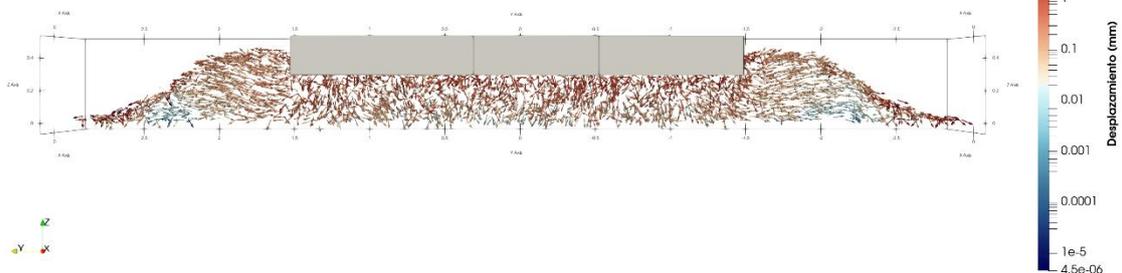
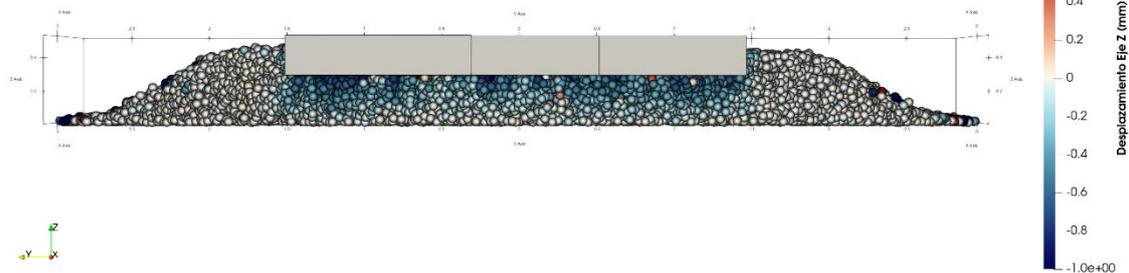


Ilustración 95. Desplazamiento tridimensional de las partículas de balasto en el momento del 1º eje del 1º bogie (arriba), 1º eje del 3º bogie (centro), 1º eje del 5º bogie (abajo) sobre la traviesa. (Elaboración propia)

En la Ilustración 96 se representa el desplazamiento vertical del balasto en el momento en el que el primer eje de cada bogie se encuentra sobre la traviesa. Como se puede apreciar al principio, en la imagen superior, al estar aplicándose la carga del primer eje los desplazamientos verticales del balasto son reducidos. Sin embargo, si se observa la imagen central el desplazamiento vertical de las partículas aumenta debido a que ahora sobre ese balasto la carga actuante es la del paso del primer bogie, el paso del segundo bogie y la acción del primer eje del tercer bogie. A partir del paso del tercer bogie, los desplazamientos del balasto aumentan, pero sin presentar cambios significativos como ocurre entre el cambio de la primera y segunda imagen.

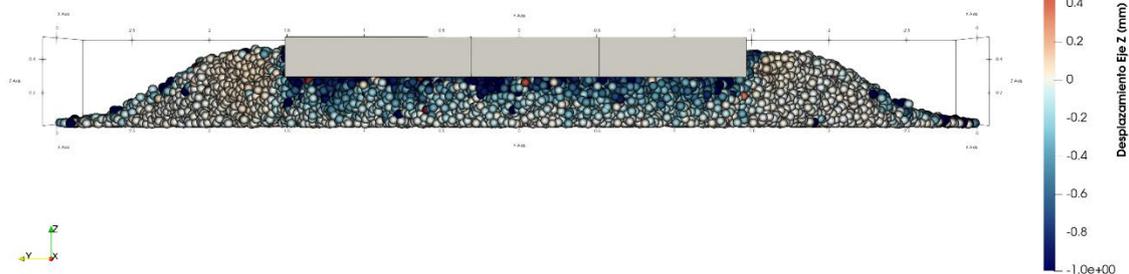
Carga Dinámica
Serie 447
V = 120 km/h
Ancho ibérico (1668mm)

Tiempo desde el inicio: + 0.060000



Carga Dinámica
Serie 447
V = 120 km/h
Ancho ibérico (1668mm)

Tiempo desde el inicio: + 0.820000



Carga Dinámica
Serie 447
V = 120 km/h
Ancho ibérico (1668mm)

Tiempo desde el inicio: + 1.580000

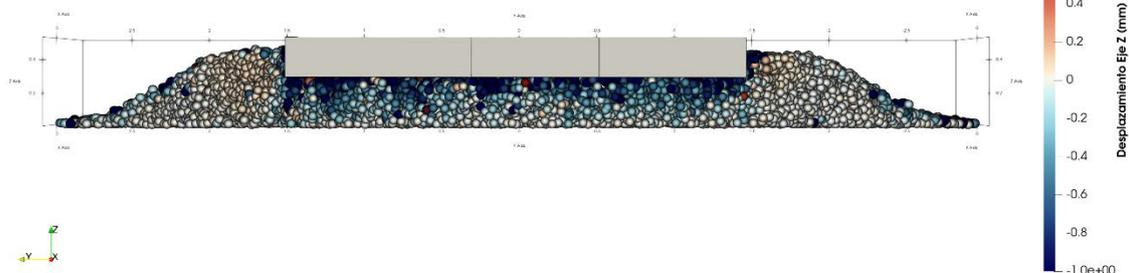


Ilustración 96. Desplazamiento vertical de las partículas de balasto en el momento del 1º eje del 1º bogie (arriba), 1º eje del 3º bogie (centro), 1º eje del 5º bogie (abajo) sobre la traviesa. (Elaboración propia)

A continuación, en la Ilustración 97 se representan los desplazamientos horizontales de las partículas de balasto. Observando esta componente se aprecian mayores diferencias que al observar los desplazamientos verticales. Como se puede apreciar en la primera imagen correspondiente al momento de carga del primer eje del primer bogie el desplazamiento lateral de las partículas es prácticamente nulo. Sin embargo, en la última imagen se puede apreciar como en la zona bajo traviesa las partículas se desplazan sin seguir un patrón claro. Donde se puede ver un patrón más definido es en los extremos de las traviesas en donde se puede apreciar esos cúmulos de partículas desplazándose lateralmente.

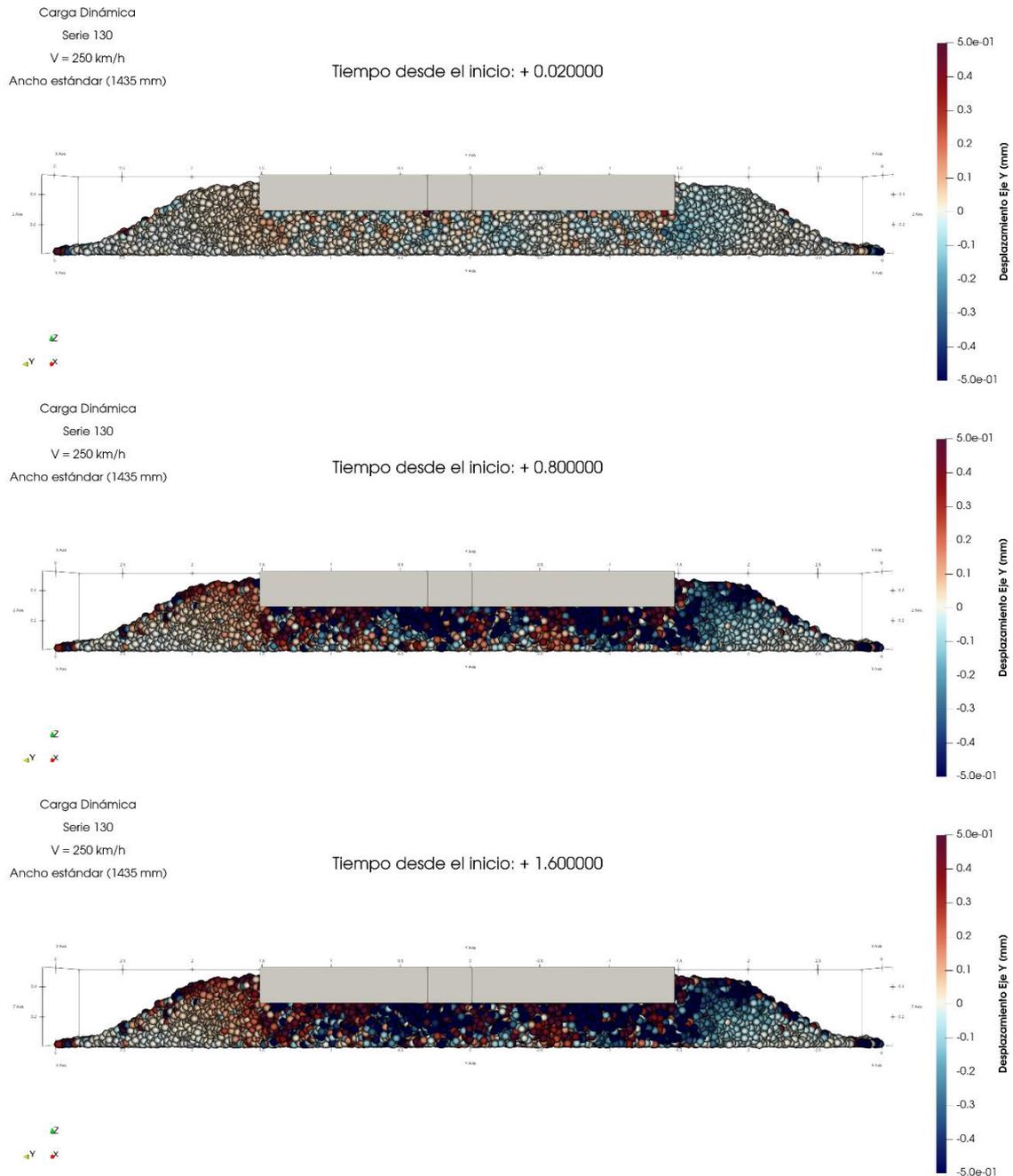


Ilustración 97. Desplazamiento vertical del balasto en el momento del 1º eje del 1º bogie (arriba), 1º eje del 3º bogie (centro), 1º eje del 5º bogie (abajo) sobre la traviesa. (Elaboración propia)

6.5.2.3 Velocidad de las partículas de balasto

Eje simple

Durante la carga progresiva de la traviesa, las partículas que alcanzan los valores mayores de velocidad son las que se encuentran directamente debajo de la traviesa. Debido a la respuesta elástica de la capa de balasto, las velocidades varían con el tiempo y pueden llegar a tomar valores casi nulos en ciertos momentos, como se muestra en la Ilustración 98.

Este comportamiento es el esperado en una capa de balasto, ya que uno de sus principales requisitos es que sea elástica. Esta variabilidad en las velocidades también provoca que el descenso de la traviesa sea irregular a lo largo del tiempo, tal como se mencionó en apartados anteriores.

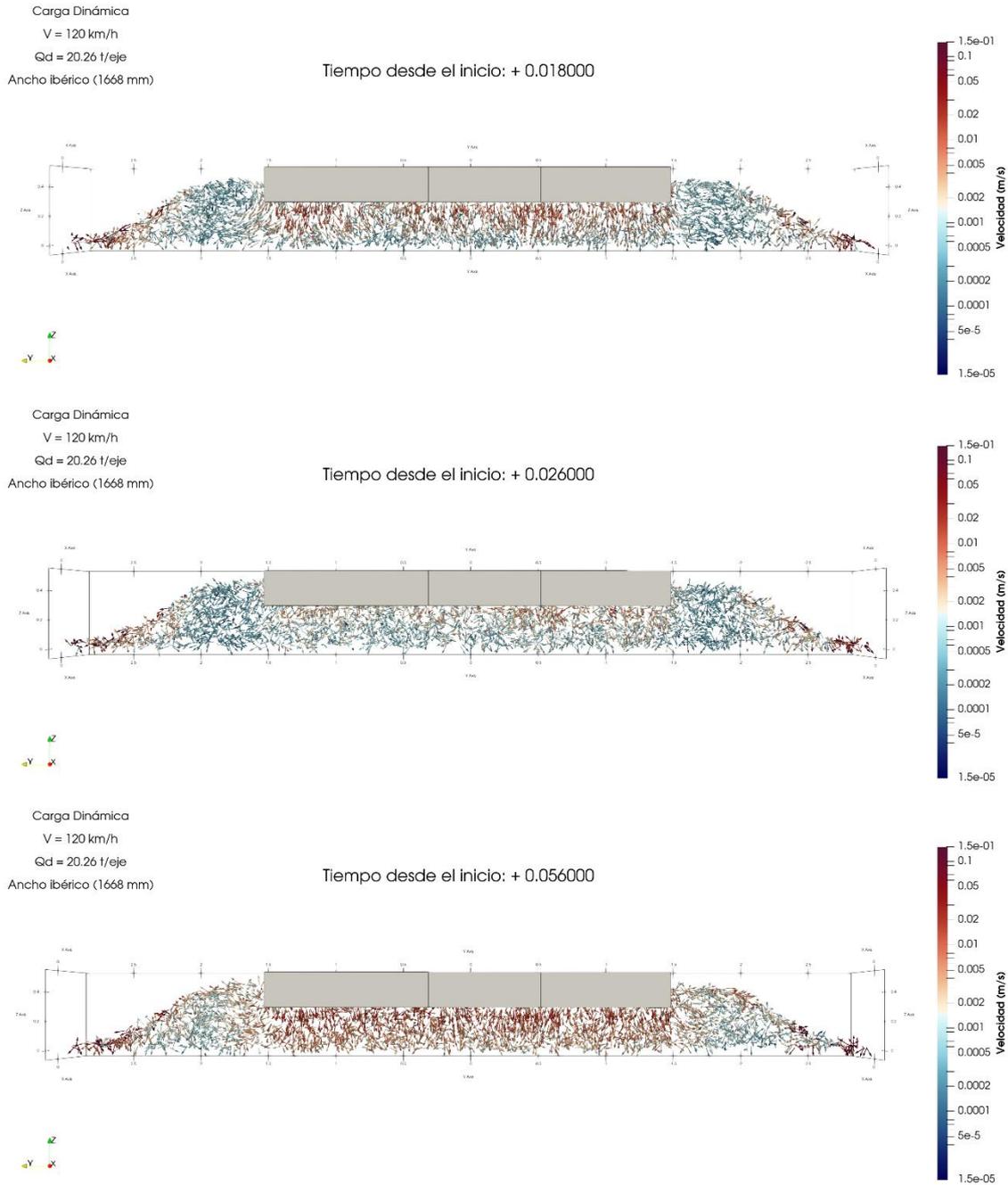


Ilustración 98. Secuencia de las velocidades de las partículas de balasto durante la fase de acercamiento del eje hacia la traviesa. (Elaboración propia)

Serie 447 completa

El comportamiento de la capa de balasto al paso de la unidad completa es muy similar al observado en el caso de un único eje, sin mostrar diferencias significativas. La única salvedad es ese pequeño incremento en el número de partículas que adquieren un valor de velocidad considerable. En la Ilustración 99 se representa la secuencia de paso del primer bogie de la composición. Como se puede observar en la imagen central hay un menor número de partículas con un valor de velocidad significativo. Esto es debido a que al tratarse de la zona central del bogie la carga es menor que si se tratara del propio eje, como ocurre en la imagen superior e inferior.

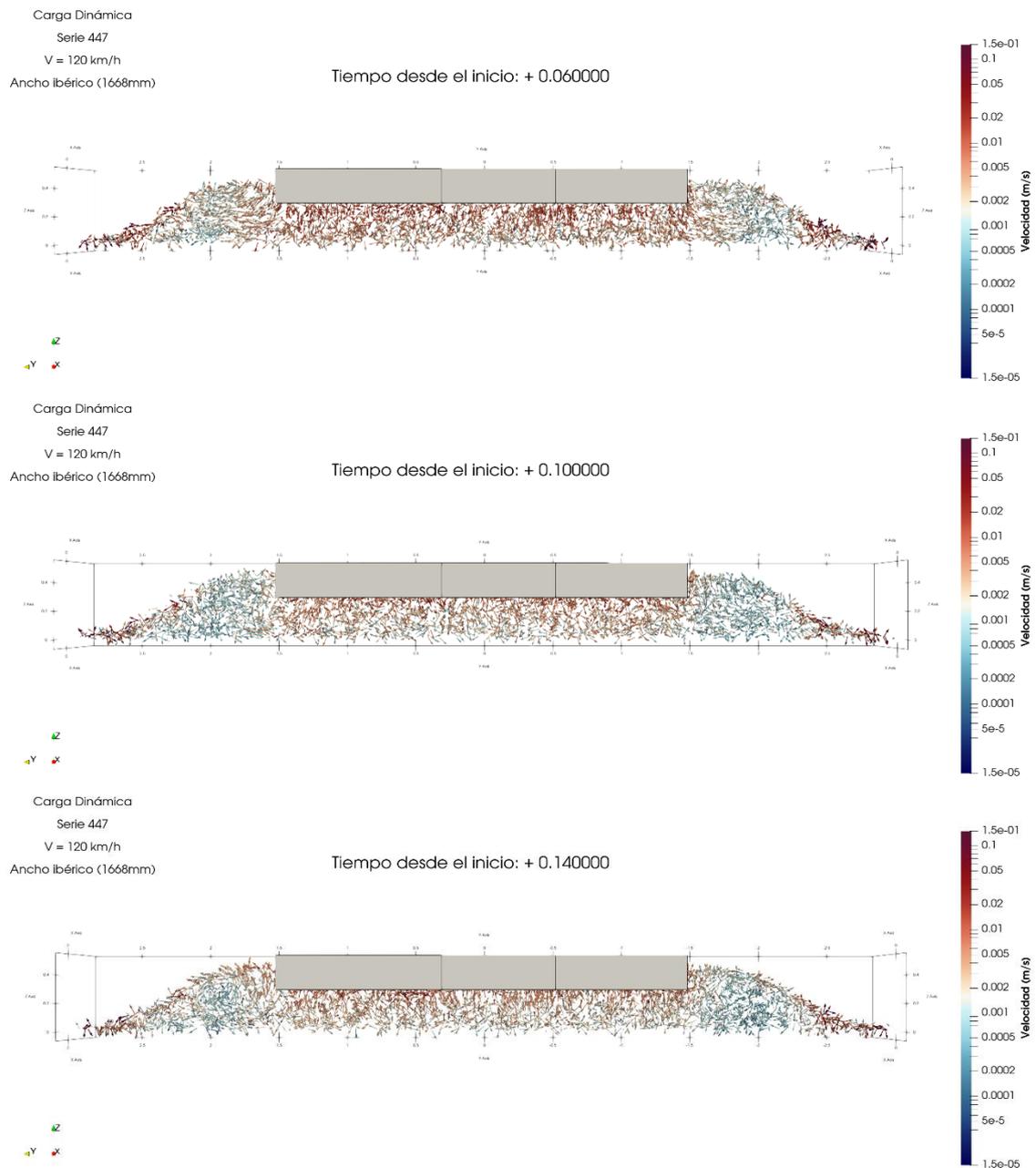


Ilustración 99. Velocidad de las partículas de balasto tras la acción sobre la traviesa de: 1º eje del 1º bogie (arriba), zona central del bogie (centro) y 2º eje del 1º bogie (inferior). (Elaboración propia)

6.5.2.4 Cadena de fuerzas

Eje simple

A continuación, se representan en la Ilustración 100 una vista en alzado y en planta de las cadenas de fuerzas ocasionadas en el momento de máxima carga sobre la traviesa, es decir, en el momento en el que el eje está colocado encima de la traviesa. Como se puede observar las cadenas de fuerzas para cargas dinámicas han sido necesarias que se limiten los valores máximos a 250 N ya que con valores mayores no se apreciaban casi ninguna cadena. Esto es debido a que al tratarse de cargas dinámicas las cuales actúan por un periodo corto de tiempo las cadenas de fuerzas son menores en comparación con lo que ocurriría si se aplica una carga puramente estática.

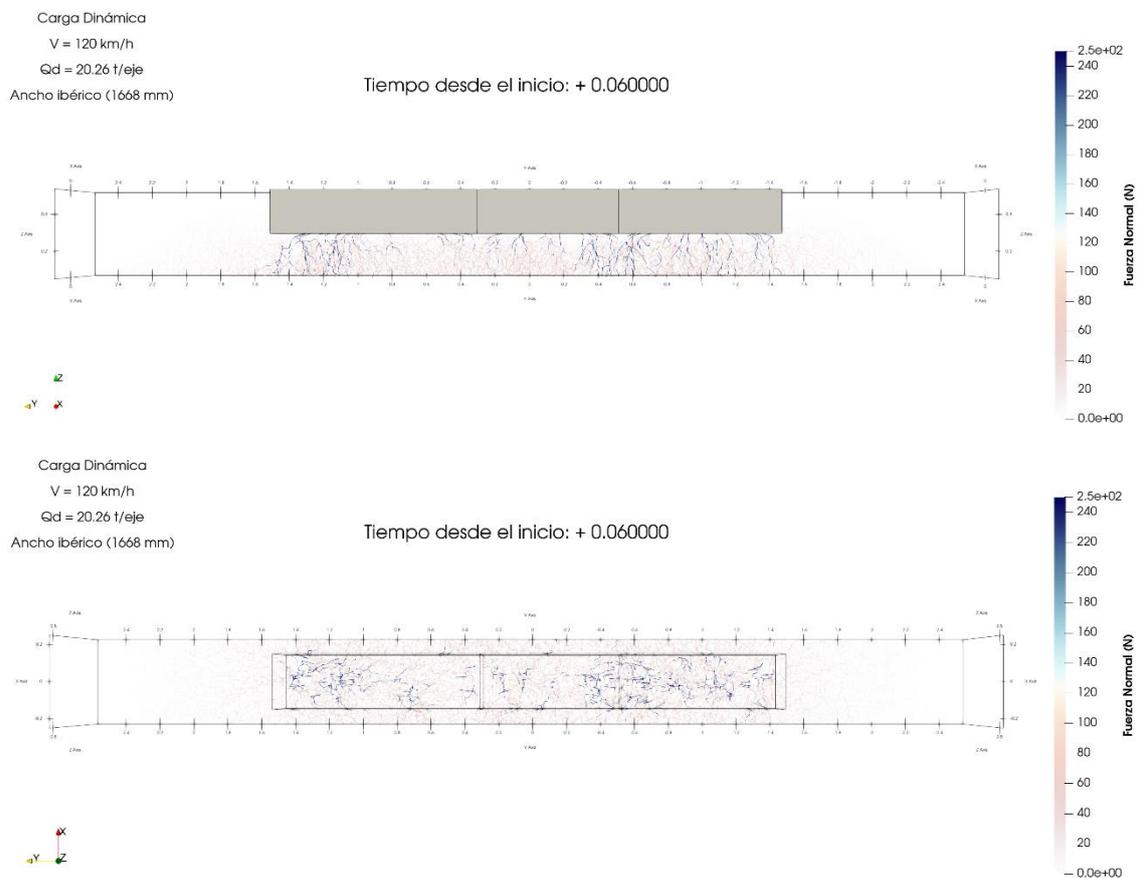


Ilustración 100. Vistas en alzado y planta de las cadenas de fuerzas en la capa de balasto en el momento en el que el eje esta sobre la traviesa. (Elaboración propia)

Serie 447 completa

En la Ilustración 101 se representan las vistas en alzado de las cadenas de fuerzas en los momentos más característicos a nivel de fuerzas normales entre partículas de balasto. En las siguientes imágenes se han representado los momentos en los que el primer eje de cada bogie está actuando sobre la traviesa. Como se puede observar en este caso también ha sido necesario limitar los valores de cadenas hasta 250 N para poder apreciar mejor las cadenas de fuerzas.

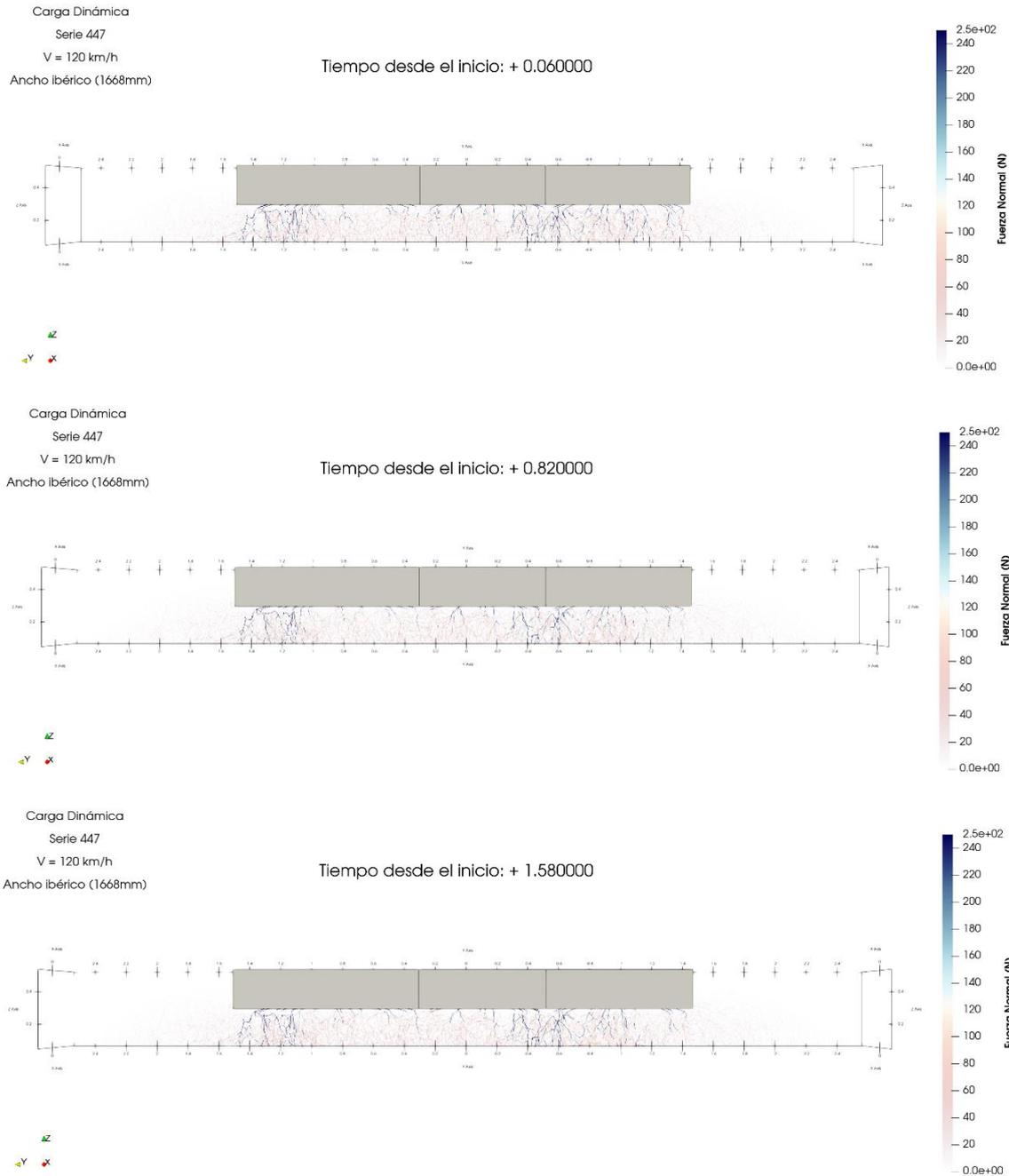


Ilustración 101. Secuencia de las cadenas de fuerzas tras el paso del 1º eje del 1º bogie (arriba), 1º eje del 3º bogie (centro), 1º eje del 5º bogie (abajo) sobre la traviesa. (Elaboración propia)

6.5.3 Caso 2: Serie 130

Acto seguido se procederá a hacer el análisis del comportamiento de la capa de balasto para una vía de ancho estándar tras el paso de un eje de la Serie 130 y la composición completa de la misma. Como ya se ha comentado anteriormente, se realizará la simulación con una velocidad de paso de 250 km/h.

6.5.3.1 Descenso de la traviesa

Eje simple

En la Ilustración 102 se representa el desplazamiento de la traviesa tras el proceso de carga y descarga de esta debido al paso de un eje de la Serie 130 a una velocidad de 250 km/h. Como se puede observar se produce un nuevo fenómeno el cual no se habría producido en ninguno de los casos anteriores. El fenómeno es el levantamiento de la traviesa tras el paso de un eje o de una serie de ejes sobre una traviesa. Como se puede observar al final de la gráfica se produce un levantamiento de 0,18 mm en la traviesa. Esto es debido a la alta velocidad de paso del eje y a la respuesta elástica que tiene la capa de balasto. Al comportarse la capa de balasto en su conjunto como un material elástico, se produce este levantamiento. El fenómeno se debe a que al aplicar una carga y descarga de manera rápida las partículas de balasto se recolocan produciendo ese pequeño levantamiento. Se estima, ya que no hay ningún estudio que determine cual es el valor exacto, que el ascenso de la traviesa es de entre un 10-15 % del descenso total producido en la traviesa.

Cabe destacar que este fenómeno se dará en una vía siempre y cuando esta cumpla una condición: que no haya asientos permanentes producidos por el elevado número de trenes y carga. En el caso que pase esto será necesario realizar operaciones de bateado en la vía para restaurar esa elasticidad buscada en la capa de balasto. También es importante destacar que en la vía la traviesa tiene una serie de restricciones verticales producidas por la rigidez de los carriles, pero se ha demostrado que se produce ese pequeño levantamiento cuando un tren pasa a altas velocidades.

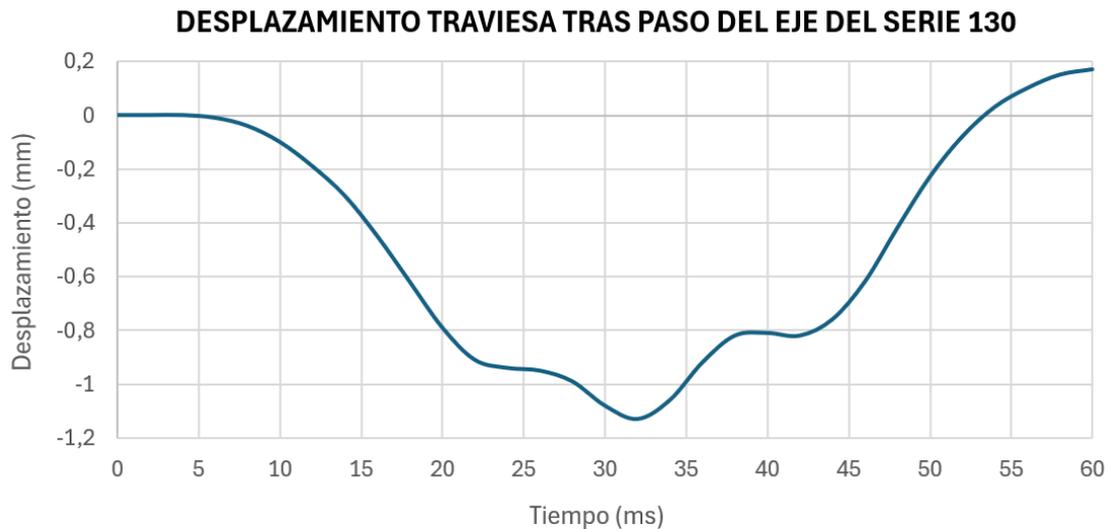


Ilustración 102. Representación gráfica del desplazamiento de la traviesa tras el paso de un eje de la Serie 130. (Elaboración propia)

Serie 130 completa

En la Ilustración 103 se representa el desplazamiento de la traviesa tras el paso de la composición de la Serie 130. Como se puede observar se produce el mismo fenómeno de levantamiento observado en tras el paso de un único eje. En este caso al descender la traviesa más que en el caso de un único eje el levantamiento que se produce es mayor. También se puede observar cómo al finalizar el paso de la composición la traviesa ha descendido desde su posición inicial un total de 1,8 mm. Por lo tanto, se han producido una serie de asientos los cuales no han podido ser revertidos por la elasticidad de la capa de balasto.

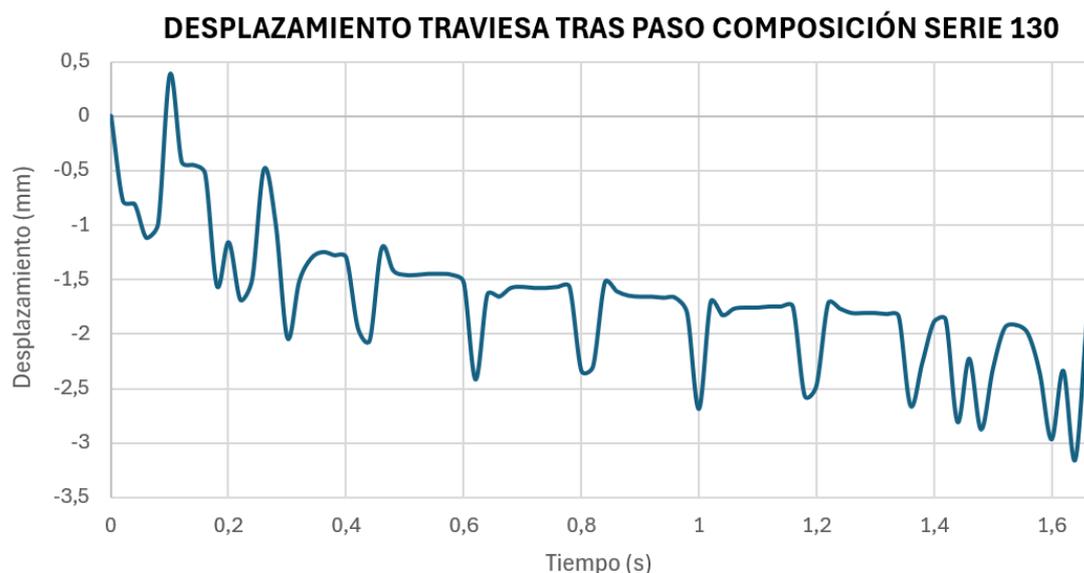


Ilustración 103. Desplazamiento de la traviesa tras el paso de la composición de la Serie 130 a una velocidad de 250 km/h. (Elaboración propia)

6.5.3.2 Desplazamiento de las partículas de balasto

Eje simple

A continuación, en la Ilustración 104 se representa el desplazamiento tridimensional de las partículas de balasto tras el paso de un eje simple de la Serie 130 en la secuencia de carga de esta. A rasgos generales las diferencias encontradas con el paso del eje de la Serie 447 no son muy significativas. La principal diferencia observada es el número de partículas involucradas en dicho desplazamiento y la magnitud de estos.

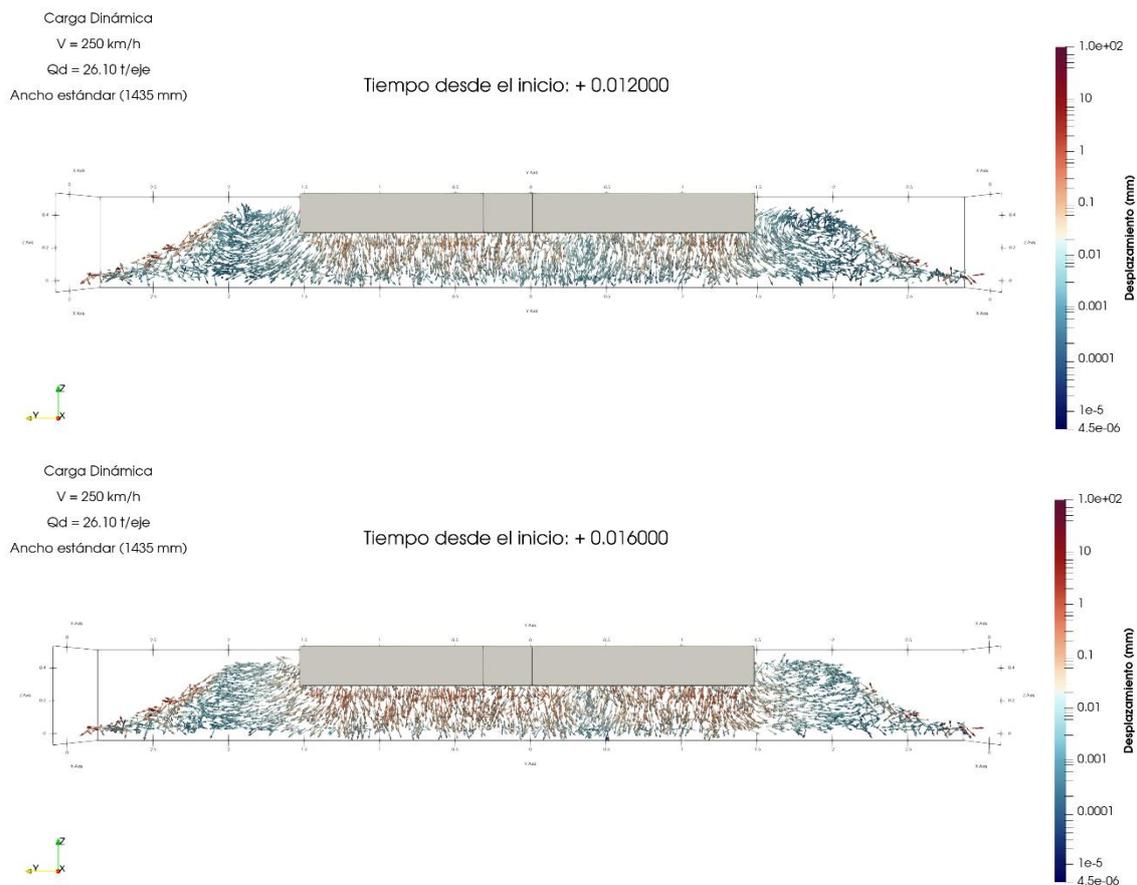


Ilustración 104. Desplazamiento tridimensional del balasto durante el proceso de carga de la traviesa. (Elaboración propia)

A continuación, se ha procedido a representar en la Ilustración 105 el momento en el que el eje apoya completamente sobre la traviesa, es decir, el momento en el que el valor de la carga aplicada es máximo. Como se puede apreciar en esta ilustración hay un gran movimiento de las partículas bajo traviesa que provocan a su vez el empuje de las partículas de alrededor, produciéndose así el hinchamiento en las zonas de las hombreras.

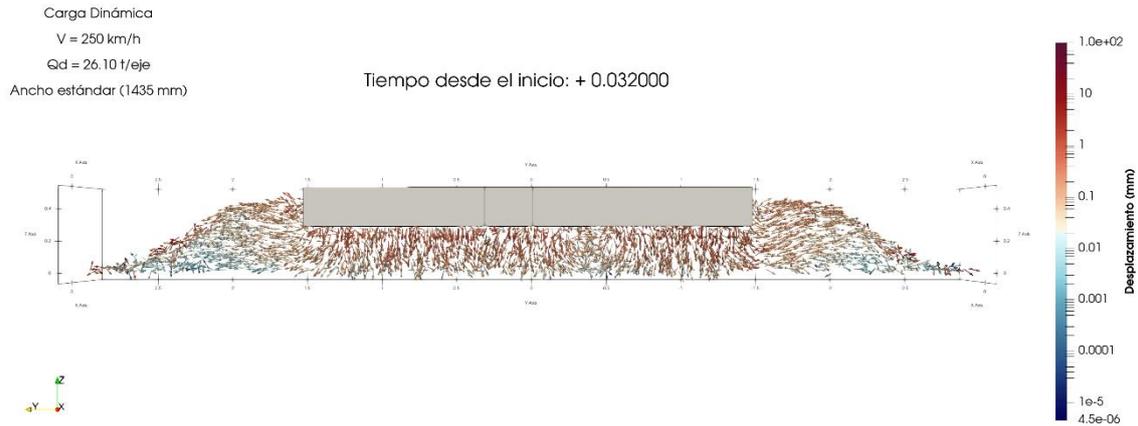
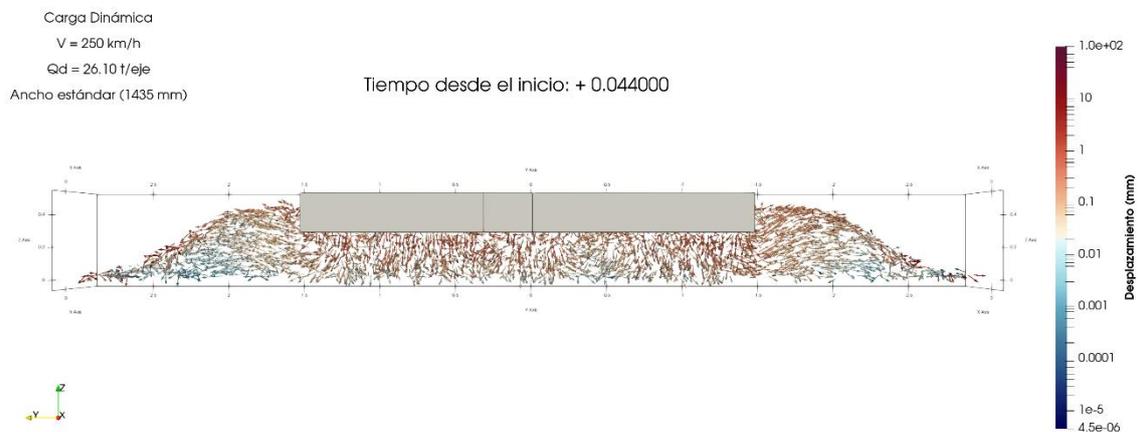


Ilustración 105. Momento de máxima aplicación de la carga tras el paso del eje sobre la traviesa. (Elaboración propia)

En la Ilustración 106 se representa el proceso de descarga de la traviesa una vez el eje ya ha cruzado sobre esta. Como se puede observar, la imagen superior corresponde a cuando el eje ha cruzado la traviesa, pero aún está a una distancia cercana a este por lo cual el desplazamiento de las partículas sigue siendo significativo. Sin embargo, en la siguiente imagen corresponde a un momento en el cual el eje está mucho más alejado de la traviesa por lo cual el desplazamiento de las partículas empieza a ser mucho menos. Además, se puede apreciar como conforme el eje se va alejando de la traviesa, el hinchamiento en las hombreras empieza a disminuir.



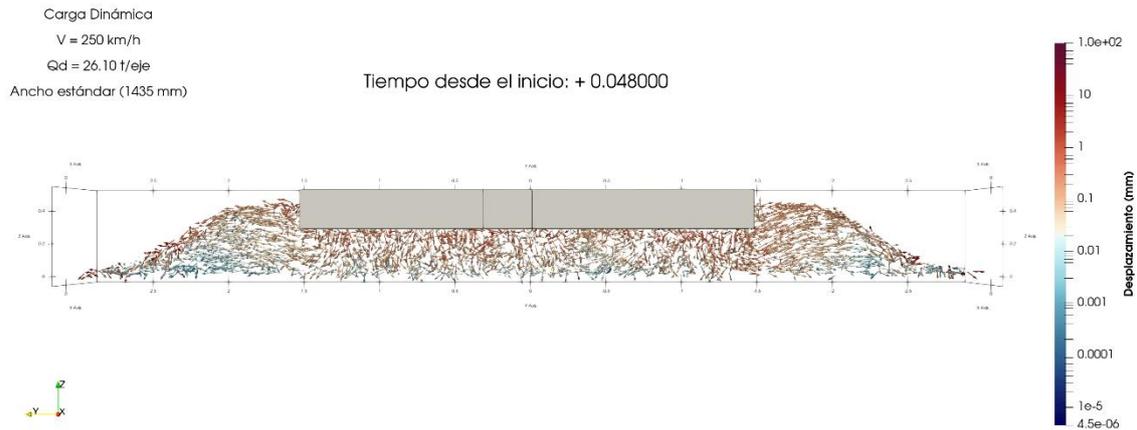


Ilustración 106. Proceso de descarga de la traviesa una vez el eje ha sobrepasado la misma. (Elaboración propia)

Por último, en la Ilustración 107 se muestra el momento en el cual la traviesa se ha liberado de cualquier carga producida por el eje, es decir, la acción del peso del eje ya no afecta a la traviesa debió a que se encuentra a una distancia mayor a 1,8 metros. Como se puede apreciar las flechas que indican la dirección de cada partícula de balasto muestran que no hay ningún patrón claro lo cual hace indicar que las partículas se han ido recolocando de manera aleatoria. Como se puede observar las partículas más cercanas a la base de la traviesa se desplazan más en comparación con las partículas de la base de la capa de balasto, lo cual indica como las piedras más cercanas a la traviesa están sometidas a una mayor carga que las más alejadas.

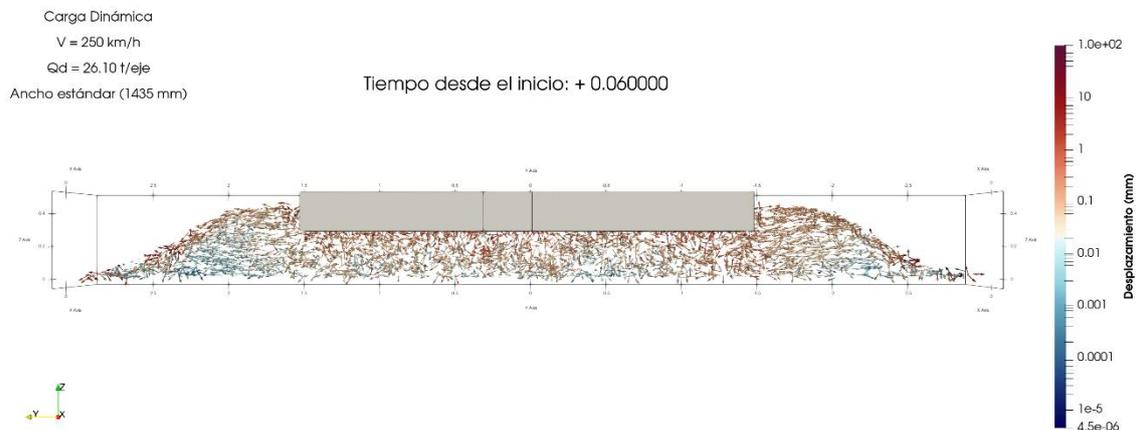


Ilustración 107. Desplazamiento de las partículas de balasto tras la descarga completa de la traviesa. (Elaboración propia)

Acto seguido, en la Ilustración 108 se procede a representar la componente de los desplazamientos en el eje Z, es decir, los desplazamientos verticales de las partículas de la capa de balasto. Se ha decidido representar únicamente el tiempo correspondiente a 32 ms ya que es el momento en el que mayor carga hay sobre la traviesa debido a que el eje está situado completamente sobre esta. Se puede observar como todas las partículas de debajo de la traviesa están descendiendo, aunque el número de partículas involucradas no es muy grande.

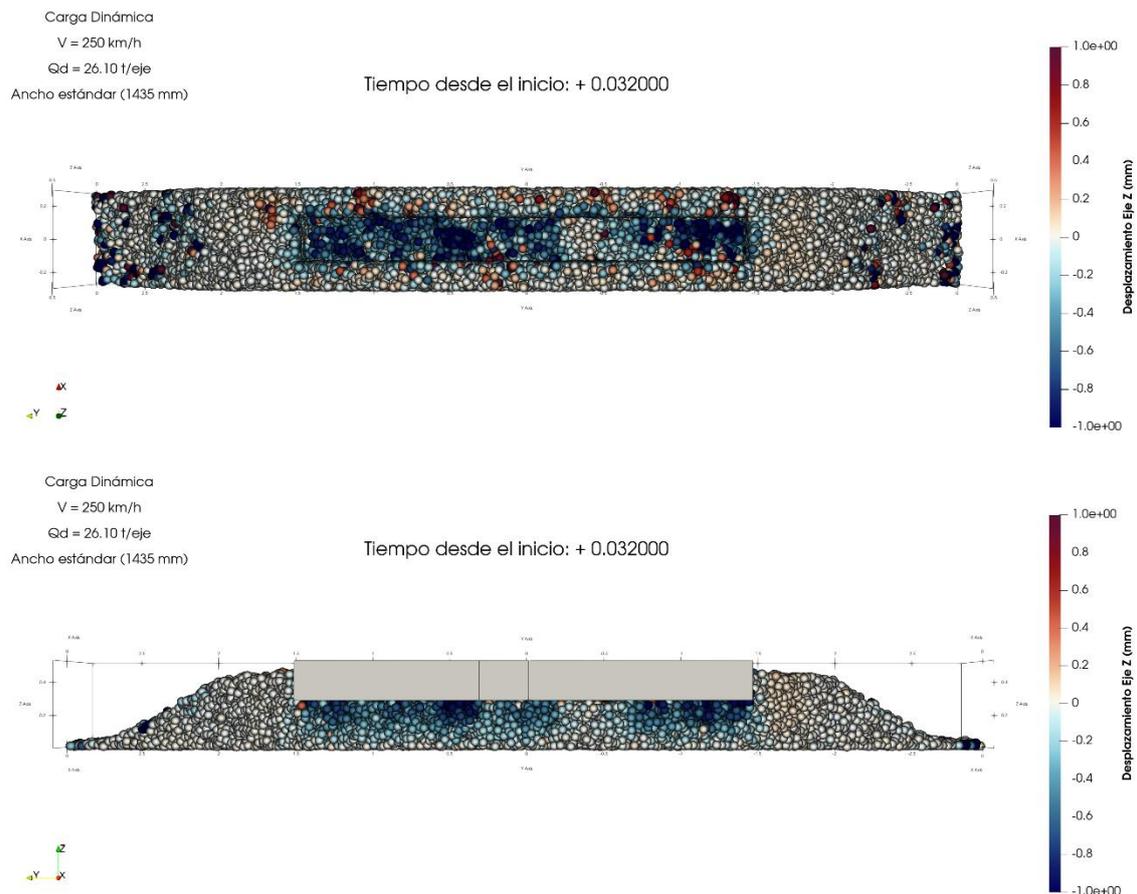


Ilustración 108. Vistas en planta y alzado de los desplazamientos verticales de las partículas de balasto. (Elaboración propia)

A continuación, se ha procedido a representar en la Ilustración 109 la otra magnitud significativa en el análisis de los desplazamientos de la capa de balasto, el desplazamiento en el eje Y o lo que es lo mismo, el movimiento de las partículas horizontalmente. Como se puede observar, la zona donde más se pueden apreciar estos desplazamientos es en los extremos de la traviesa en la cual se puede percibir una leve coloración azulada y rojiza. Esta coloración se debe a que las partículas bajo traviesa desplazan a las partículas colindantes produciéndose así estas zonas de coloración.

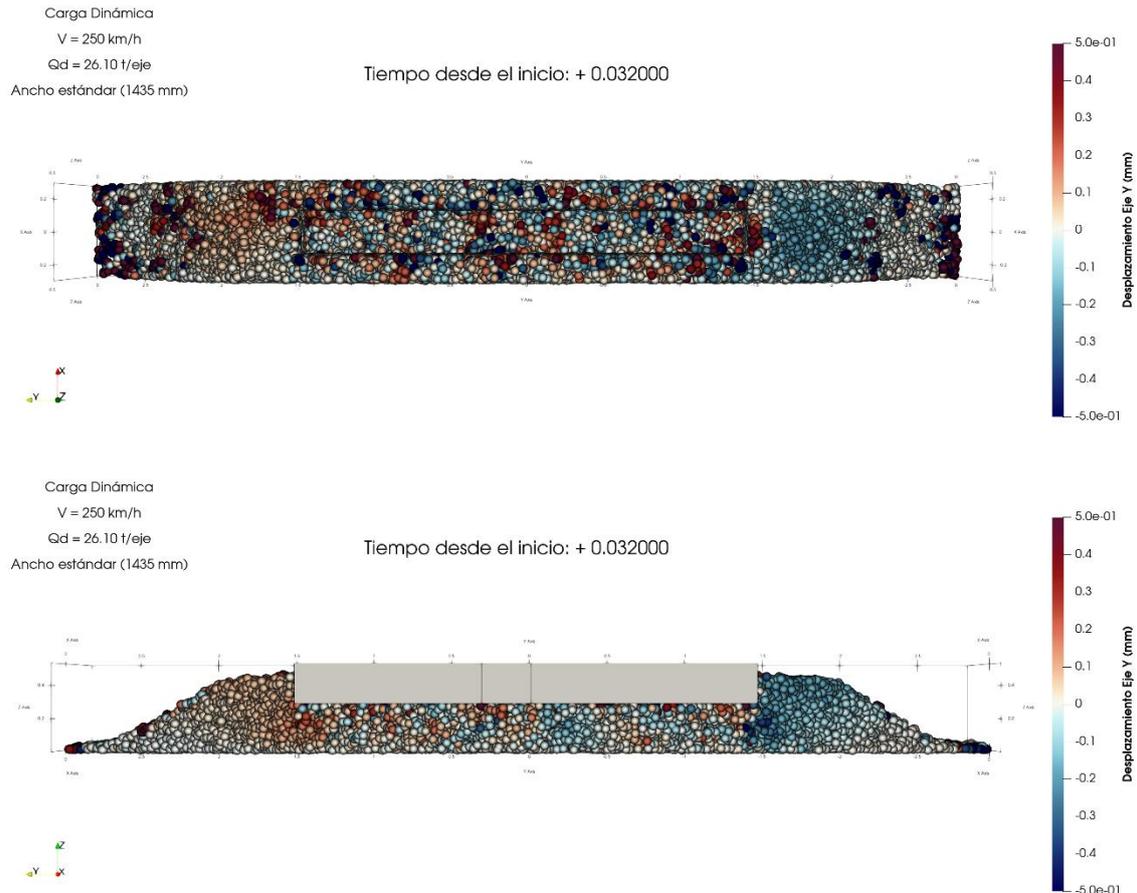


Ilustración 109. Vistas en planta y alzado de los desplazamientos laterales de las partículas de balasto. (Elaboración propia)

Serie 130 completa

El comportamiento de las partículas de balasto tras el paso de los ejes de cada bogie es comparable al observado con un solo eje de la Serie 130, aunque hay variaciones en las repeticiones y frecuencias de las cargas y descargas. Lo más notable en términos de desplazamientos para toda la unidad es la deformación que se produce después del paso de los diversos ejes del tren, lo que permite analizar los asentamientos permanentes en la vía.

En la Ilustración 110 se representan algunos de los momentos más significativos en el desplazamiento tridimensional de las partículas de la capa de balasto. Se ha optado por representar el momento en el que el primer eje de la composición, el eje central de la composición y el último eje están sobre la traviesa. Como se puede observar, en la primera imagen, las únicas partículas de balasto que adquieren un cierto desplazamiento son las que se encuentran bajo la traviesa. Conforme van pasando los ejes de la composición, cada vez son más las partículas afectadas y se empieza a observar el movimiento lateral de las partículas de las hombreras. Otro detalle para destacar es esa fina capa de partículas de que hay en los extremos

de la banqueta la cual se desplaza de forma lateral, lo que hace indicar ese derrame de las partículas de balasto hacia los extremos de la banqueta.

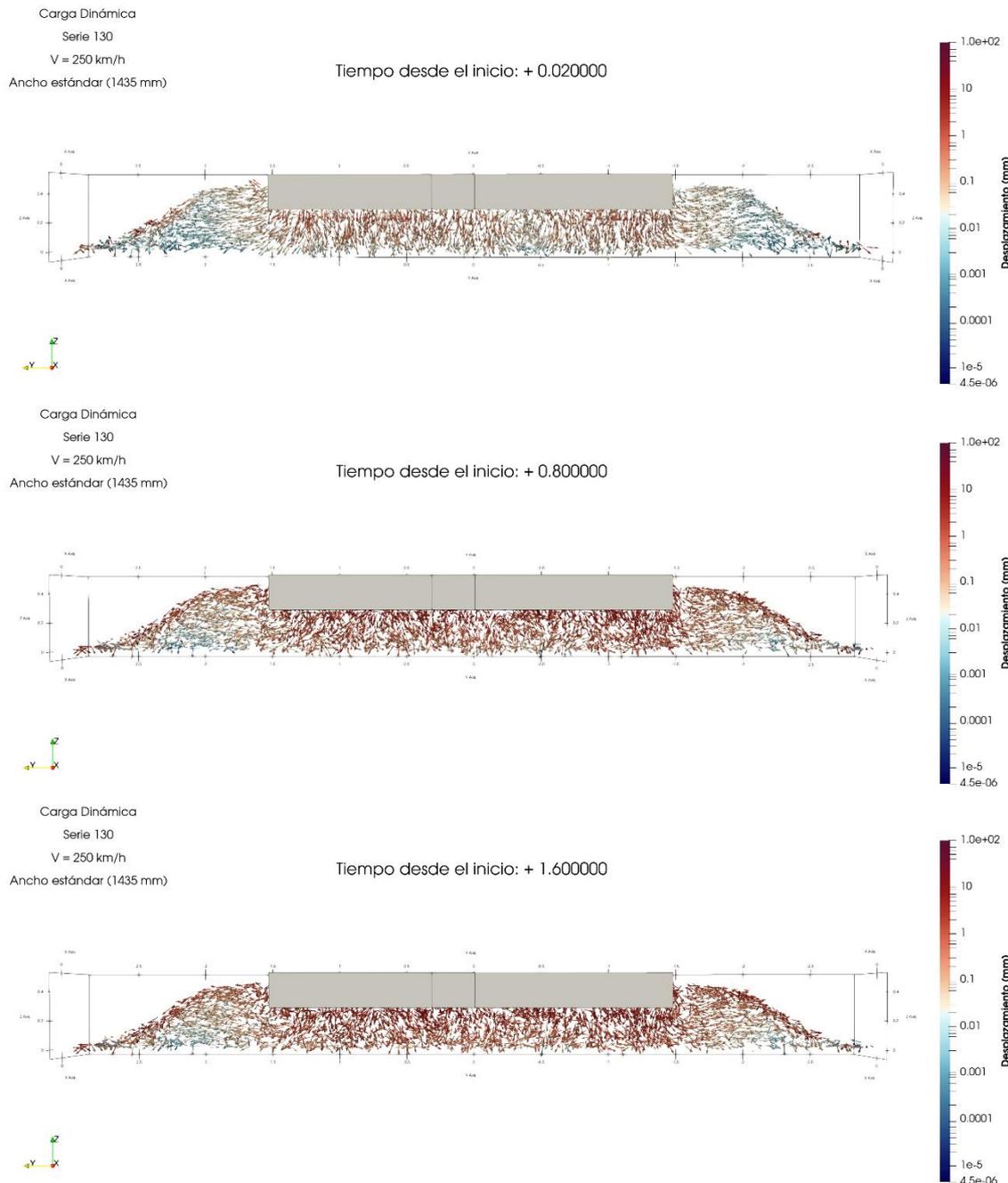


Ilustración 110. Representación del desplazamiento tridimensional de las partículas de balasto en el momento en el que el primer eje, el eje central y el último eje se encuentran sobre la traviesa. (Elaboración propia)

Acto seguido se ha representado en la Ilustración 111 las vistas en alzado del desplazamiento vertical en los momentos en el que el primer eje, el eje central y el último eje se encuentran sobre la traviesa. Como era de esperar, conforme mayor es el número de eje que ha pasado por la traviesa, mayor es el número de partículas involucradas en este desplazamiento. También cabe destacar que a partir del paso de un cierto número de eje el desplazamiento de las

partículas se va limitando debido a la compresión, es decir, conforme los ejes pasan por la travesía, las partículas se van compactando y cada vez van desplazándose menos.

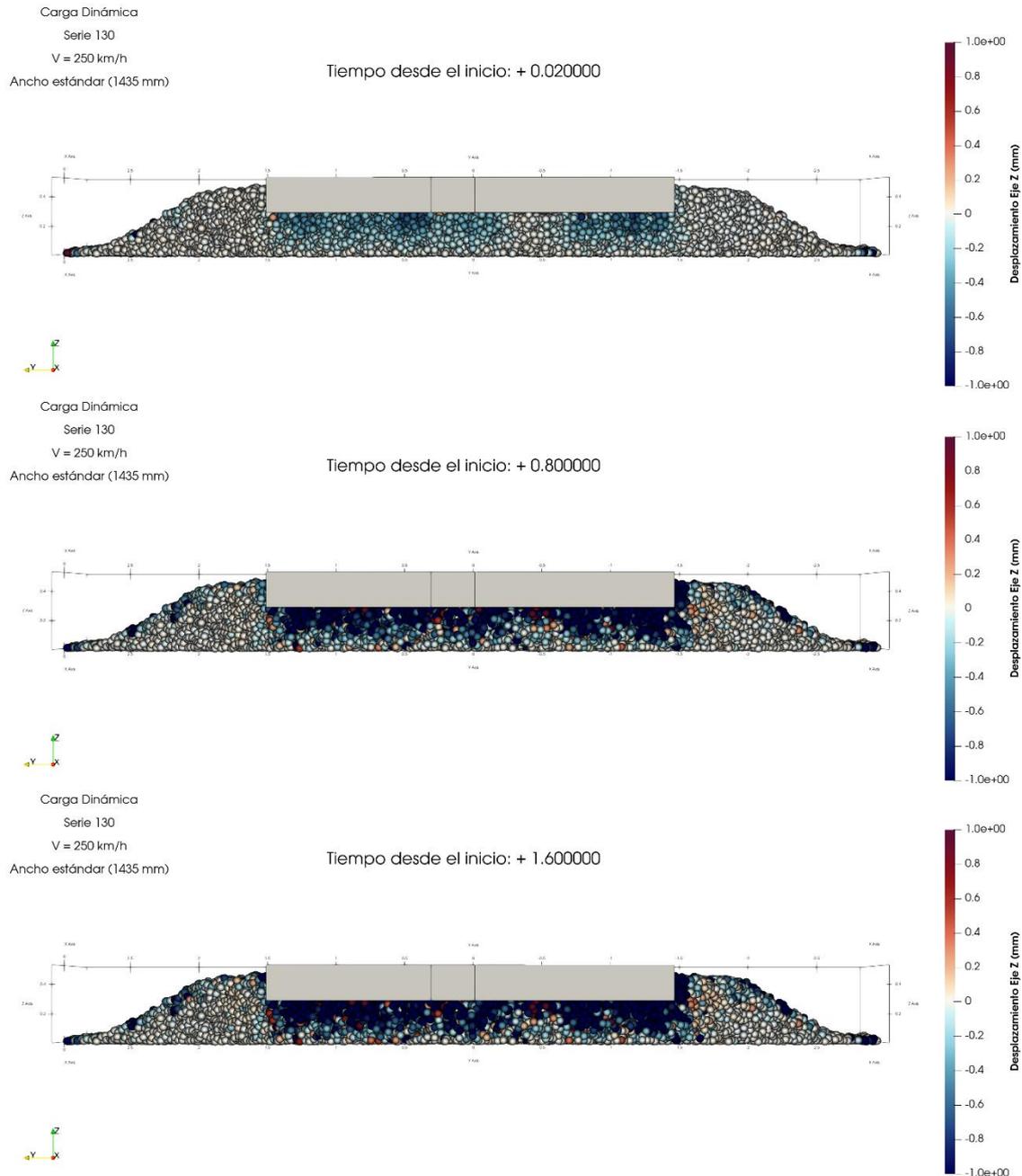


Ilustración 111. Desplazamiento vertical de las partículas de balasto en el momento en el que el primer eje, el eje central y el último eje se encuentran sobre la travesía. (Elaboración propia)

La otra magnitud interesante desde el punto de vista del análisis del desplazamiento de las partículas es la componente de eje Y. Esta componente es interesante de analizar ya que es la encargada de transmitir rigidez transversal a la vía, por lo tanto, es importante que se analizada. En la Ilustración 112 se representan los desplazamientos laterales de las partículas en el momento en el que el primer eje, el eje central y el último eje de la composición se encuentran sobre la travesía. Como era de esperar, en el momento en que el primer eje se encuentra sobre la

traviesa no se aprecian desplazamientos debido a que las partículas bajo traviesa no están ejerciendo empujes horizontales a las partículas de los laterales. Sin embargo, tras el paso del último eje se puede apreciar como un elevado número de partículas se desplaza lateralmente. Bajo la traviesa no se aprecia ningún patrón claro de desplazamiento, pero en los extremos de esta se ven zonas de coloración roja y azul las cuales indican ese desplazamiento horizontal.

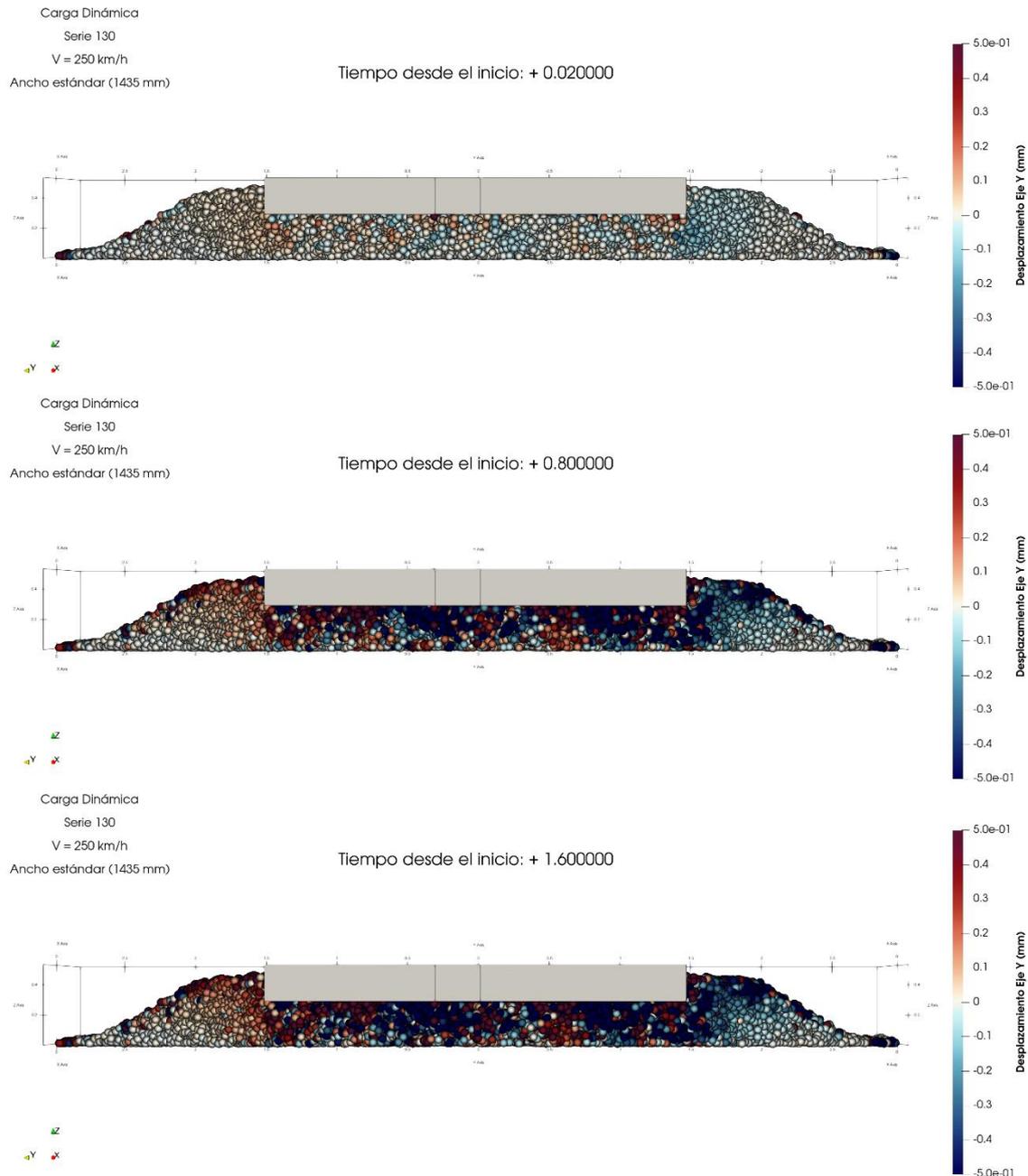


Ilustración 112. Desplazamiento horizontal de las partículas de balasto en el momento en el que el primer eje, el eje central y el último eje de la composición se encuentran sobre la traviesa. (Elaboración propia)

6.5.3.3 Velocidad de las partículas de balasto

Eje simple

A la hora de analizar la velocidad de las partículas de balasto lo más interesante es hacerlo en el proceso de carga y descarga de la traviesa para un eje simple. Por lo tanto, en la Ilustración 113 se representa una secuencia de imágenes con las velocidades de las partículas de balasto correspondientes al proceso de carga de la traviesa, eje sobre la traviesa y descarga de la traviesa, respectivamente. Como se puede apreciar en el proceso de carga y descarga las partículas adquieren unos valores de velocidad significativos y una dirección fuertemente definida. Sin embargo, en el momento en que el eje está sobre la traviesa las partículas no adquieren un patrón definido.

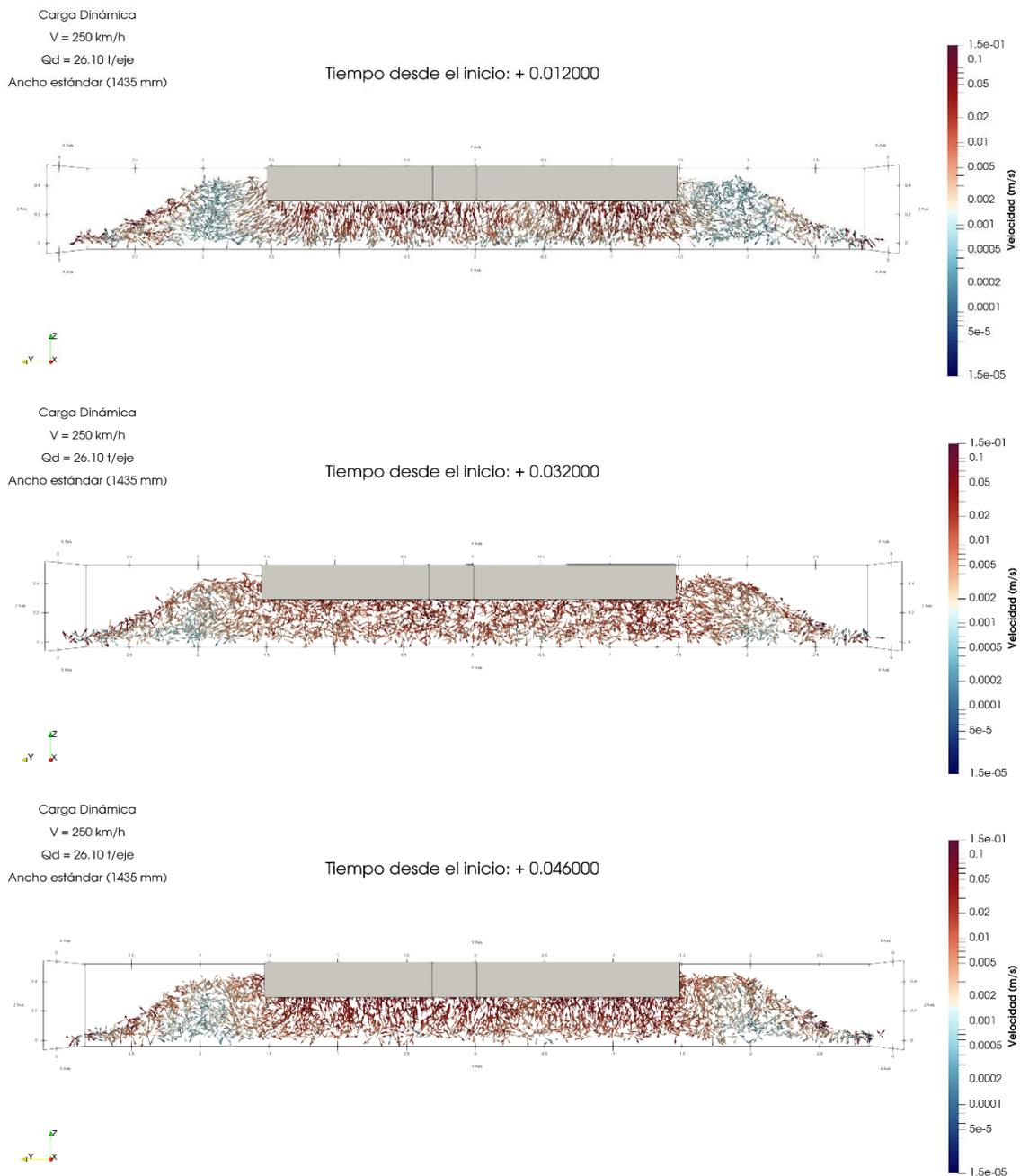


Ilustración 113. Representación de las velocidades de las partículas de balasto en el proceso de carga (arriba), eje sobre traviesa (centro) y descarga (abajo). (Elaboración propia)

Serie 130 completa

Acto seguido se ha representado en la Ilustración 114 la velocidad de las partículas en el momento en que esta sobre la traviesa el primer eje del bogie, la zona central del bogie y el segundo eje del bogie. Como se puede apreciar en la primera y tercera imagen, las cuales corresponden al primer y segundo eje, el valor de la velocidad de las partículas es mayor en comparación a la segunda imagen, ya que la carga que ejerce el eje es mayor a la que ejerce el centro del bogie sobre la traviesa.

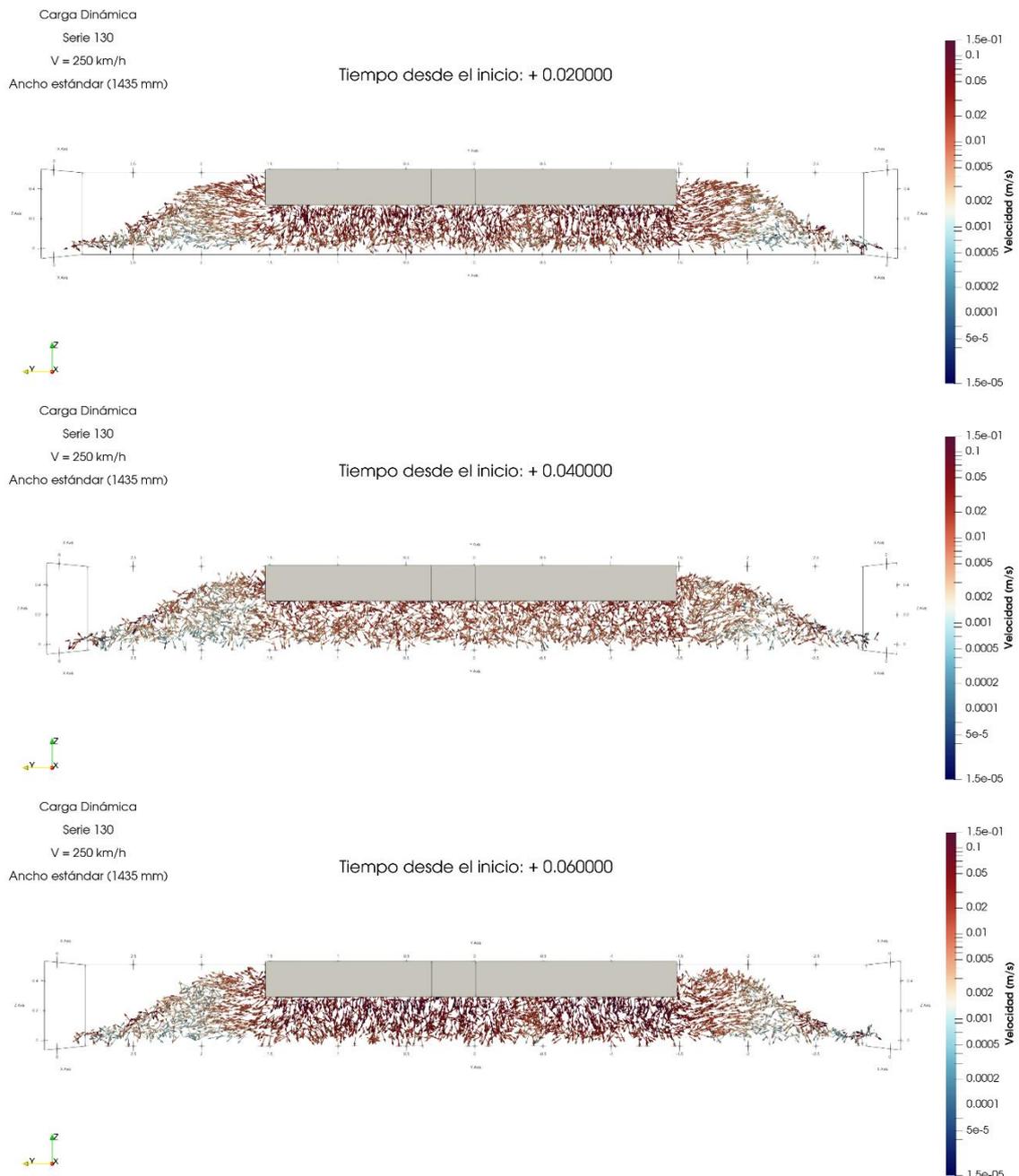


Ilustración 114. Representación de las velocidades de las partículas tras el paso del primer eje del bogie, la zona central del bogie y el segundo eje del bogie en una composición de la Serie 130. (Elaboración propia)

Finalmente, en la Ilustración 115 se ha representado la velocidad de las partículas en el momento en el que el eje central de la composición esta sobre la traviesa. Se ha optado por representar este momento debido a que ningún otro eje afecta a las partículas de balasto y además al balasto le ha dado tiempo de descargarse totalmente antes de llegar a este momento. Como se puede apreciar, se observan los tres factores más característicos en las velocidades del balasto. El balasto bajo traviesa el cual adquiere mayor velocidad, después el balasto de las hombreras el cual es influenciado por las partículas bajo traviesa y el balasto de los extremos de la banqueta el cual está casi en reposo.

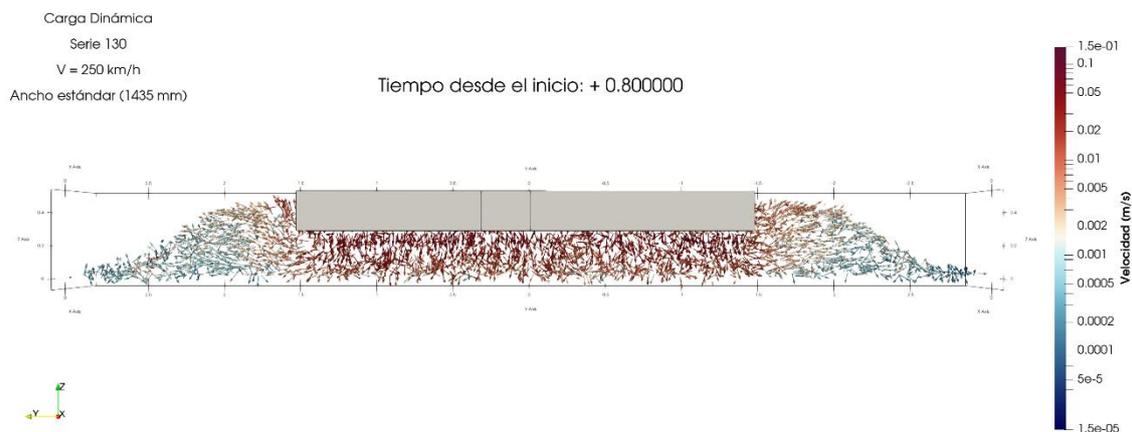


Ilustración 115. Representación de las velocidades del balasto en el momento en el que el eje central de la composición esta sobre la traviesa. (Elaboración propia)

6.5.3.4 Cadena de fuerzas

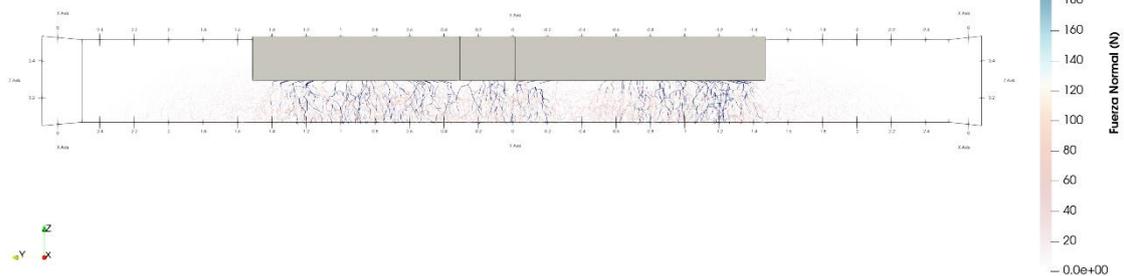
Acto seguido se va a representar las cadenas de fuerzas normales entre las partículas de balasto. Cabe destacar que, igual que para el caso de la Serie 447, en este caso también ha sido necesario limitar el valor de las cadenas de fuerzas a 250 N para que se puede apreciar a simple vista. Esto se debe a que, al producirse la carga de manera rápida debido a la velocidad de la composición, si no se limita el valor máximo no se puede apreciar a simple vista las cadenas de fuerzas.

Eje simple

En la Ilustración 116 se representa una vista en alzado y en planta de las cadenas de fuerzas actuantes debido al paso de un eje simple de la Serie 447. Se ha procedido a representar el momento en el que el eje esta sobre la traviesa debido a que es el momento en el que mayor valor tendrán las cadenas de fuerzas.

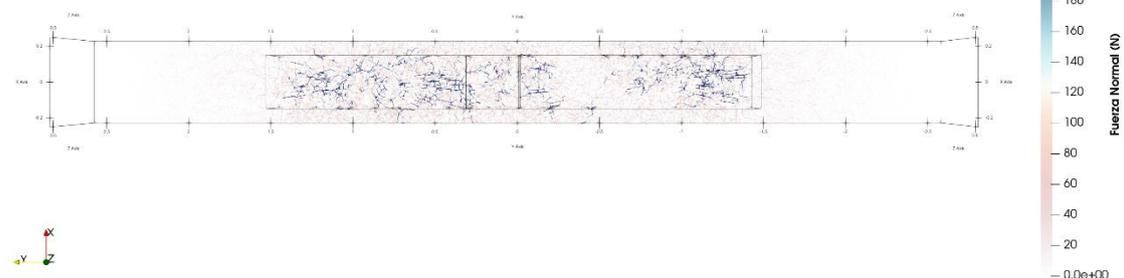
Carga Dinàmica
V = 250 km/h
Qd = 26.10 t/eje
Ancho estàndar (1435 mm)

Tiempo desde el inicio: + 0.032000



Carga Dinàmica
V = 250 km/h
Qd = 26.10 t/eje
Ancho estàndar (1435 mm)

Tiempo desde el inicio: + 0.032000



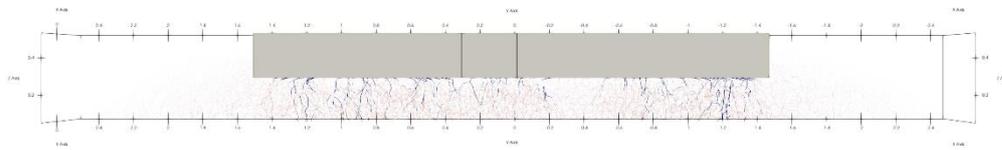
Il·lustració 116. Representació de les cadenes de forces normals en el moment de màxima aplicació de la carga. (Elaboració pròpia)

Serie 130 completa

Finalmente se ha procedido a representar en la Ilustración 117 los momentos más significativos respecto a los valores de las cadenas de fuerzas. Se ha decidido representar el primer eje, el eje central y el último eje de la composición. Como se puede observar, conforme más ejes van pasando por encima de la traviesa, más se acentúan las cadenas de fuerzas. Esto es debido principalmente a que la capa de balasto se va compactando cada vez más y por ende mayores cadenas de fuerzas se producen.

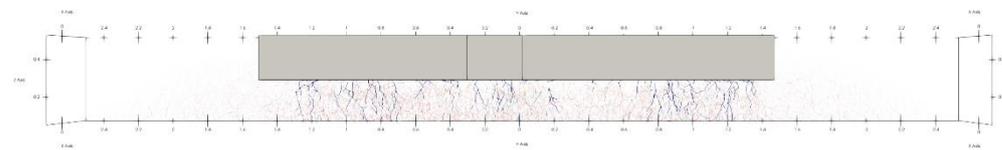
Carga Dinámica
Serie 130
V = 250 km/h
Ancho estándar (1435 mm)

Tiempo desde el inicio: + 0.020000



Carga Dinámica
Serie 130
V = 250 km/h
Ancho estándar (1435 mm)

Tiempo desde el inicio: + 0.800000



Carga Dinámica
Serie 130
V = 250 km/h
Ancho estándar (1435 mm)

Tiempo desde el inicio: + 1.600000

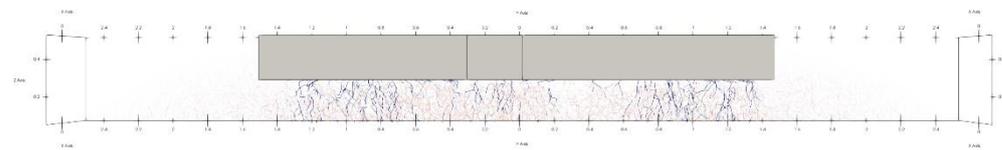


Ilustración 117. Cadenas de fuerzas en el momento en el que el primer eje, el eje central y el último eje de la composición se encuentra sobre la traviesa. (Elaboración propia)

7 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En la revisión de los resultados, se ha resaltado la significativa influencia que la creación del modelo puede ejercer al utilizar diversas solicitudes sugeridas. Esto ocurre porque varios elementos en el desarrollo del modelo están basados en la aleatoriedad en la formación de partículas y sus conexiones. La diversidad natural de este procedimiento puede tener un gran impacto en los resultados alcanzados, destacando la importancia de tener en cuenta estos aspectos al analizar la información y planificar estudios siguientes. Por lo tanto, es vital considerar esta sensibilidad para aumentar la exactitud y confiabilidad del modelo empleado.

A pesar de que los resultados obtenidos generalmente están dentro de la misma escala, es imprescindible llevar a cabo una verificación más exhaustiva de la sensibilidad presente durante la implementación del modelo. Se han creado dos nuevos modelos de traviesa única llamados Réplica 1 y Réplica 2 para este propósito. Ya que en el presente trabajo hay dos anchos distintos, ancho ibérico y ancho estándar, se ha optado por elegir uno de los dos ya que al estar generados ambos aleatoriamente y con el mismo proceso, si un modelo se comporta bien en el análisis de sensibilidad el otro también debe de comportarse de forma correcta. Para poder comparar los descensos de la traviesa con el modelo original, las dos réplicas han sido sometidos a una carga estática similar a la de un eje de un Serie 252. Para el presente trabajo se ha optado por realizar el análisis de sensibilidad comparando los descensos en la vía de ancho ibérico.

En la Ilustración 118 se representan los descensos de la traviesa de cada réplica del modelo en comparación con el modelo original. La simulación del modelo original muestra el mayor descenso con un valor de 1,600 mm, seguido por la Réplica 2 con descenso de 1,573 mm y, por último, el menor descenso, el de la Réplica 1, con un valor de 1,542 mm. Esto destaca que, al menos para el número de casos probados, las diferencias entre el modelo original y las dos réplicas generadas son de alrededor del 2 %, por lo tanto, no son significativas y se puede suponer que los resultados serán apropiados en la mayoría de los casos.

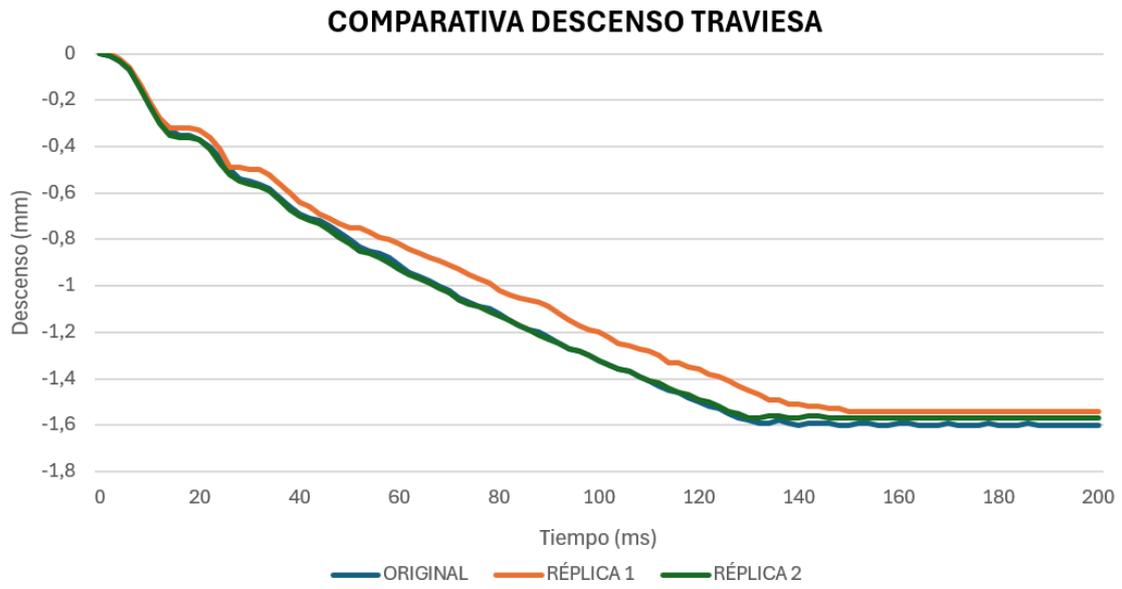


Ilustración 118. Comparativa de los descensos de la traviesa para realizar análisis de sensibilidad. (Elaboración propia)

8 CONCLUSIONES

8.1 Recopilación de resultados

El incremento del tráfico y del peso por eje sobre las infraestructuras ferroviarias representa un reto para la capa de balasto y sobre todo para las vías de ancho mixto. La utilización del Método de Elementos Discretos ha permitido evaluar tanto cualitativa como cuantitativamente el comportamiento de una capa granular, cuya modelización es compleja debido a la dificultad de medir ciertas magnitudes en la vía. Además, ha permitido realizar una comparativa exhaustiva de como varia el comportamiento del balasto en función del ancho de vía por el que circule el material rodante. La ventaja de aplicar un modelo numérico radica en que nos facilita obtener datos sobre el comportamiento del balasto que serían difíciles de conseguir mediante pruebas de campo o de laboratorio, permitiendo analizar variables que no pueden medirse debido a limitaciones técnicas y a la falta de dispositivos adecuados.

Se ha llevado a cabo un estudio sobre el comportamiento de la capa de balasto en el tramo ferroviario comprendido entre Valencia y Sagunto el cual presenta una importante singularidad ya que es uno de los principales tramos en España que cuenta con una vía de ancho mixto. Además, este estudio es de gran relevancia debido a que no se han realizado muchos estudios sobre la vía de ancho mixto.

Se ha sometido el modelo generado a diferentes solicitaciones, tanto en vía de ancho estándar como de ancho ibérico, para entender cómo afectan las circulaciones más significativas del tramo, como los trenes de mercancías y los trenes de cercanías, a la capa de balasto. Para esto, se diseñaron solicitaciones de creciente complejidad, iniciando por cargas puramente estáticas hasta llegar a solicitaciones dinámicas en las que se ha buscado simular de la manera más certera posible el comportamiento en la capa de balasto tras el paso de trenes por una vía de ancho mixto. Gracias a la realización de distintos casos de carga se ha podido comparar los efectos y tener una visión general de cómo se comporta la capa de balasto. A continuación, se recoge una lista con los casos de carga que se han aplicado:

- Carga estática simulando el peso máximo por eje del material móvil de la Serie 252 tanto por vía de ancho estándar como de ancho ibérico.
- Se ha simulado la presencia de defectos en el material rodante y en la infraestructura para verificar el comportamiento diferencial del balasto ante la aplicación de cargas variables sobre la traviesa, con una carga diferencial del 20% respecto a la carga estática que generaría la Serie 252 tanto para vía de ancho estándar como para vía de ancho ibérico.

- Simulación de una carga cuasi – estática producida por un Serie 252 para velocidades de paso de 80 y 160 km/h tanto en vía de ancho estándar como ibérico.
- Se ha aplicado una carga dinámica correspondiente a un tren de cercanías, lo que ha permitido estudiar el paso de un eje simple y el paso completo de una unidad de la Serie 447 en una vía de ancho ibérico.
- Se ha aplicado una carga dinámica correspondiente a un tren de alta velocidad, lo que ha permitido estudiar el paso de un eje simple y el paso completo de una unidad de la Serie 130 por una vía de ancho estándar.

Una de las principales conclusiones halladas durante la aplicación del modelo es que la heterogeneidad de la capa de balasto es el principal factor que condiciona el comportamiento de la capa de balasto desde el punto de vista de los resultados ofrecidos por el Modelo de Elementos Discretos. Otro de los factores que influye en dicho comportamiento es el número de partículas en contacto con la traviesa. Que haya un menor número de partículas en contacto con la traviesa repercute en un incremento de los asentamientos de la vía debido a que la transmisión y distribución de los esfuerzos y tensiones aumenta al haber menos partículas en contacto con dicha traviesa. Por ello, se recomienda mantener la vía en buen estado, prestando especial atención al mantenimiento y asegurando la regularidad de la superficie de la capa de balasto. La heterogeneidad en la colocación de las partículas de la capa de balasto provoca que los esfuerzos y cadenas de fuerzas se concentren en zonas específicas bajo la traviesa en donde hay mayor acumulación de partículas de balasto. Esto es debido a que la carga transmitida por la traviesa tiene que repartirse en la capa de balasto, por lo tanto, si hay zonas donde el contacto de la traviesa con el balasto es menor o incluso nulo, el resto de las partículas tendrán que absorber mayor carga, produciéndose así concentraciones de esfuerzos. Estas concentraciones hacen que las partículas en estas áreas sean más propensas al desgaste y a la rotura, lo cual ocasionará mayores intervenciones y labores de reparación en la vía.

Dicho lo anterior y habiendo realizado el análisis del modelo para los dos tipos de ancho de vía se puede concluir que, obviando factores económicos o sociopolíticos los cuales quedan fuera de dicho trabajo, el comportamiento del modelo cuando los trenes circulan por ancho ibérico es más adecuado desde el punto de vista técnico. El principal factor condicionante ha sido que, en el modelo para la circulación de trenes por la vía ancho ibérico, la traviesa tiene un mejor contacto con las partículas de balasto. Al tener un mejor y mayor número de partículas en contacto, los descensos que se producen en la traviesa son menores, como se ha reflejado a lo largo de los análisis y como queda recogido en la Tabla 17. Si bien es cierto que las diferencias con respecto al descenso vertical no son muy significativas ya que la diferencia entre el descenso

en el caso de ancho ibérico frente al ancho estándar es de un 4 %, esta diferencia a largo plazo repercute en la vía. Al final hay que comprender que la vía es un conjunto de varios elementos trabajando de manera unívoca y por lo tanto garantizar el correcto funcionamiento de la vía erradica en ofrecer un balance entre los distintos materiales. Que una vía descienda más o menos solo asegura que desde el punto de vista técnico la vía tiene mejores cualidades y prestaciones. No obstante, no solo es importante analizar el descenso vertical de la traviesa ya que pueden producirse asientos desiguales, como se representó en el apartado 6.3 "Solicitud estática con carga diferencial". Este tipo de carga simula un asiento diferencial de la vía lo cual es importante desde el punto de vista de los asientos desiguales en la traviesa y de la rotura del balasto. Además, desde la perspectiva de la explotación de la infraestructura, una vía en la cual haya asientos diferenciales incrementa la probabilidad de accidentes de trenes y por ende la pérdida de la seguridad.

El principal problema que resulta es que cuando se diseña una vía hay que garantizar el correcto desempeño de todos los materiales. El menor descenso de una vía implica directamente una mayor rigidez vertical de esta, que a su vez repercute en un mayor desgaste y rotura del balasto, lo cual ocasionará mayor intervenciones y por lo tanto mayores costes. Sin embargo, si se opta por buscar una menor rigidez de la vía, intentado aumentar así la vida útil de la capa de balasto, surge el problema de que la capa sea demasiado elástica y por ende perjudicial para el paso de los trenes. Es por esto que en una vía es necesario buscar siempre un balance entre todos los materiales que la conforman, para poder garantizar un funcionamiento global de la vía. Dicho esto, si solo se tiene en cuenta los resultados técnicos obtenidos a lo largo del presente trabajo, la vía de ancho ibérico presenta mejores prestaciones en comparación con la vía de ancho estándar.

No obstante, los modelos numéricos son una herramienta destinada a asistir al técnico capacitado en la toma de decisiones y en la priorización de recursos. Es esencial que los técnicos cuestionen siempre la validez de los resultados proporcionados por estos modelos.

8.2 Limitaciones de la modelización

Este Trabajo Final de Grado ha realizado la modelización de un tramo ferroviario real utilizando el Método de Elementos Discretos para estudiar el comportamiento de la capa de balasto sobre una vía de ancho mixto. A pesar de los esfuerzos realizados, el modelo presenta ciertas limitaciones que ofrecen margen de mejora y abren la puerta a futuros estudios sobre el tema:

- Realizar un modelo el cual simule de manera más realista las piedras de balasto, además de implementar la rotura de las partículas, aunque esto dispare de manera exponencial los tiempos de computación.
- Introducir en el modelo factores externos que simulen factores climatológicos como lluvias, heladas o temperaturas extremas.
- Mejorar la geometría de la traviesa, al final en el modelo se ha introducido un paralelepípedo para simular la traviesa lo cual no es del todo real. La traviesa tiene una geometría más compleja, la cual si se intentara simular aumentaría los tiempos de cálculo al tener el programa que definir mayores zonas de contacto entre el balasto y la traviesa.
- Ampliar el modelo para incluir otros elementos de la infraestructura ferroviaria, como los aparatos de vía o incluso realizar secciones curvas en donde entren en juego los perales.
- Desarrollar un modelo combinado FEM – DEM que capte las fortalezas de cada uno de los métodos de elementos.
- Por último, está el problema que se ha observado a lo largo de los resultados de la simulación de la vía de ancho estándar, esa zona en la cual no se transmitían bien los desplazamientos y por ende ni las velocidades ni las cadenas de fuerzas. En si lo que está pasando no es un error directo del modelo. El fallo erradica en la naturaleza del material del balasto el cual es irregular y, por lo tanto, al tratarse de una colocación aleatoria del balasto, dentro de unos valores preestablecidos, es posible que haya zonas de menor contacto o incluso de contacto nulo. La solución a esto es simular, como ocurre en la vida real, una placa de asiento bajo traviesa la cual permita regularizar el contacto entre la traviesa y el balasto.

Por lo tanto, como se ha podido observar a lo largo del presente estudio se ha intentado realizar un balance entre el tiempo de computación y los resultados obtenidos. Está claro que siempre se ha optado por priorizar la veracidad de los resultados, aunque el tiempo de computación aumentase, pero hay partes como se ha mencionado anteriormente que se ha decidido simplificarlas o que simplemente por las limitaciones de los programas empleados no se ha podido llegar a un nivel de exactitud total.

8.3 Cumplimiento de los objetivos propuestos

Durante este trabajo se han establecido los fundamentos teóricos y se ha creado un modelo de comportamiento de la capa de balasto para vías de ancho mixto el cual se ha aplicado al tramo ferroviario comprendido entre Valencia y Sagunto. Cabe destacar que, aunque la

aplicación del modelo haya sido a un tramo en concreto el modelo es apto para ser aplicado, con ciertas modificaciones, a cualquier tramo ferroviario español que albergue una vía de ancho mixto.

Se han alcanzado los objetivos inicialmente propuestos al inicio de este documento:

- Se ha logrado desarrollar un modelo de comportamiento de la capa de balasto bajo travesía enfocado a vías de ancho mixto.
- Se ha verificado que el modelo es válido para simular el comportamiento real del balasto, verificado mediante la comparación con rigideces obtenidas en ensayos de campo.
- Se ha implementado de manera exitosa el modelo en el tramo ferroviario entre Valencia y Sagunto, obteniendo información que no se puede obtener mediante ensayos y adquiriendo conocimientos que pueden ser empleados en tanto en el diseño de la vía como en las labores de mantenimiento.
- Se ha analizado la sensibilidad del modelo y se han identificado las restricciones que deben considerarse durante su aplicación.

Se espera que el presente trabajo sirva como base para seguir indagando a un más en el comportamiento ya no solo de la capa de balasto en vías de ancho mixto, sino del conjunto de la vía en general ya que los avances y mejoras que pueden surgir en materia ferroviaria son inmensas.

9 BIBLIOGRAFÍA

Abdelkrim, M., Bonnet, G., & De Buhan, P. (2003). A computational procedure for predicting the long-term residual settlement of a platform induced by repeated traffic loading. *Computers and Geotechnics*, 30(6), 463-476. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(03\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(03)00010-7)

Aboul Hosn, R., Sibille, L., Benahmed, N., & Chareyre, B. (2017). Discrete numerical modeling of loose soil with spherical particles and interparticle rolling friction. *Granular Matter*, 19(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0687-0>

Abril, C (2013). Projecte constructiu del nou accés ferroviari en ample estàndar a l'estació de Puigcerdà. [Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/21772>

Adif, Declaración sobre la red 2025

Adif. ET 03.360.004.0 "Balasto".

Adif. ET 03.360.161.8 "Carril".

Adif. ET 03.360.571.8 "Traviesas monobloque de hormigón pretensado".

Adif. NAP 1-2-1.0 "Metodología para el diseño del trazado ferroviario".

Adif. NAV 3-1-2.1 "Traviesas monobloque de hormigón".

Adif. NAV 3-4-1.0 "Dimensionado de la banqueta".

Ahmed, S., Harkness, J., Le Pen, L., Powrie, W., & Zervos, A. (2016). Numerical modelling of railway ballast at the particle scale. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 40(5), 713-737. <https://doi.org/10.1002/nag.2424>

Alabbasi, Y., & Hussein, M. (2021). Geomechanical Modelling of Railroad Ballast: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(3), 815-839. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09390-4>

- Balamonica, K., Bergamini, A., & Van Damme, B. (2023). Estimation of the dynamic stiffness of railway ballast over a wide frequency range using the discrete element method. *Journal of Sound and Vibration*, 547, 117533. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117533>
- Boon, C. W., Houlsby, G. T., & Utili, S. (2012). A new algorithm for contact detection between convex polygonal and polyhedral particles in the discrete element method. *Computers and Geotechnics*, 44, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.03.012>
- Boon, C. W., Houlsby, G. T., & Utili, S. (2013). A new contact detection algorithm for three-dimensional non-spherical particles. *Powder Technology*, 248, 94-102. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.040>
- Coetzee, C. J. (2016). Calibration of the discrete element method and the effect of particle shape. *Powder Technology*, 297, 50-70. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.04.003>
- Cundall, P. A. (1988). Formulation of a three-dimensional distinct element model—Part I. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 25(3), 107-116. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(88\)92293-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(88)92293-0)
- Cundall, P. A., & Hart, R. D. (1992). Numerical modelling of discontinua. *Engineering Computations*, 9(2), 101-113. <https://doi.org/10.1108/eb023851>
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1), 47-65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
- De San Damasco, R (2017). La vía de tres carriles. Situación actual y perspectivas. Dirección Ejecutiva de Operaciones e Ingeniería de Red de Alta Velocidad.
- Di Renzo, A., & Di Maio, F. P. (2004). Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. *Chemical Engineering Science*, 59(3), 525-541. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.09.037>

- Di Renzo, A., & Di Maio, F. P. (2005). An improved integral non-linear model for the contact of particles in distinct element simulations. *Chemical Engineering Science*, 60(5), 1303-1312. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.10.004>
- Eliáš, J. (2013). DEM simulation of railway ballast using polyhedral elemental shapes. III International Conference on Particle-based Methods – Fundamentals and Applications, Stuttgart, Germany.
- Eliáš, J. (2014). Simulation of railway ballast using crushable polyhedral particles. *Powder Technology*, 264, 458-465. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.052>
- Ferrellec, J.-F., & McDowell, G. R. (2010). A method to model realistic particle shape and inertia in DEM. *Granular Matter*, 12(5), 459-467. <https://doi.org/10.1007/s10035-010-0205-8>
- Gallego, I., Muñoz, J., Rivas, A., & Sánchez-Cambronero, S. (2011). Vertical Track Stiffness as a New Parameter Involved in Designing High-Speed Railway Infrastructure. *Journal of Transportation Engineering*, 137(12), 971-979. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000288](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000288)
- García, X., Latham, J.-P., Xiang, J., & Harrison, J. P. (2009). A clustered overlapping sphere algorithm to represent real particles in discrete element modelling. *Géotechnique*, 59(9), 779-784.
- Hertz, H. (1882). Über die Berührung fester elastischer Körper. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 92, 156-171.
- Houlsby, G. T. (2009). Potential particles: A method for modelling non-circular particles in DEM. *Computers and Geotechnics*, 36(6), 953-959. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.03.001>
- Indraratna, B., Thakur, P. K., & Vinod, J. S. (2010). Experimental and Numerical Study of Railway Ballast Behavior under Cyclic Loading. *International Journal of Geomechanics*, 10(4), 136-144. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000055](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000055)

- Irazábal González, J. (2017). Numerical analysis of railway ballast behaviour using the Discrete Element Method [Universitat Politècnica de Catalunya].
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/114012>
- Irazábal, J., Salazar, F., & Oñate, E. (2017). Numerical modelling of granular materials with spherical discrete particles and the bounded rolling friction model. Application to railway ballast. *Computers and Geotechnics*, 85, 220-229.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.12.034>
- Jiang, M. J., Yu, H.-S., & Harris, D. (2005). A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance. *Computers and Geotechnics*, 32(5), 340-357.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2005.05.001>
- Koivisto, K., Hellberg, J., Forsman, J., Lämsivaara, T. (2009). Finite Element Modelling of Deep Stabilization Test Structures Used in Attenuating Railway Induced Ground Vibration at Koria, Finland.
- Kozicki, J., & Tejchman, J. (2011). Numerical simulations of sand behaviour using dem with two different descriptions of grain roughness. II International Conference on Particle-based Methods – Fundamentals and Applications.
- Laryea, S., Safari Baghsorkhi, M., Ferrellec, J.-F., McDowell, G. R., & Chen, C. (2014). Comparison of performance of concrete and steel sleepers using experimental and discrete element methods. *Transportation Geotechnics*, 1(4), 225-240.
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.05.001>
- Lim, W. L., & McDowell, G. R. (2005). Discrete element modelling of railway ballast. *Granular Matter*, 7(1), 19-29. <https://doi.org/10.1007/s10035-004-0189-3>
- Lobo-Guerrero, S., & Vallejo, L. E. (2006). Discrete Element Method Analysis of Railtrack Ballast Degradation during Cyclic Loading. *Granular Matter*, 8(3-4), 195-204.
<https://doi.org/10.1007/s10035-006-0006-2>

- Lu, M., & McDowell, G. R. (2006). The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method. *Granular Matter*, 9(1-2), 69-80. <https://doi.org/10.1007/s10035-006-0021-3>
- Mindlin, R. D., & Deresiewicz, H. (1953). Elastic Spheres in Contact Under Varying Oblique Forces. *Journal of Applied Mechanics*, 20(3), 327-344. <https://doi.org/10.1115/1.4010702>
- Nezami, E. G., Hashash, Y. M. A., Zhao, D., & Ghaboussi, J. (2004). A fast contact detection algorithm for 3-D discrete element method. *Computers and Geotechnics*, 31(7), 575-587. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2004.08.002>
- Nezami, E. G., Hashash, Y. M. A., Zhao, D., & Ghaboussi, J. (2006). Shortest link method for contact detection in discrete element method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30(8), 783-801. <https://doi.org/10.1002/nag.500>
- Ngamkhanong, C., Kaewunruen, S., & Baniotopoulos, C. (2017). A review on modelling and monitoring of railway ballast. *Structural Monitoring and Maintenance*, 4(3), 195-220. <https://doi.org/10.12989/SMM.2017.4.3.195>
- Ramunas, V., Gailiene, I., & Laurinavicius, A. (2014). Crushed rock ballast bed in the railway lines of Lithuania: Analysis of the situation and arising problems. The 9th International Conference «Environmental Engineering 2014». The 9th International Conference «Environmental Engineering 2014», Vilnius, Lithuania. <https://doi.org/10.3846/enviro.2014.164>
- Šmilauer, V., Angelidakis, V., Catalano, E., Caulk, R., Chareyre, B., Chèvremont, W., Dorofeenko, S., Duriez, J., Dyck, N., Elias, J., Er, B., Eulitz, A., Gladky, A., Guo, N., Jakob, C., Francois Kneib, Kozicki, J., Marzougui, D., Maurin, R., ... Yuan, C. (2021). *Yade Documentation 3rd ed. The Yade Project*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5705394>

- Suhr, B., & Six, K. (2020). Simple particle shapes for DEM simulations of railway ballast: Influence of shape descriptors on packing behaviour. *Granular Matter*, 22(2), 43. <https://doi.org/10.1007/s10035-020-1009-0>
- Suhr, B., Skipper, W. A., Lewis, R., & Six, K. (2020). Shape analysis of railway ballast stones: Curvature-based calculation of particle angularity. *Scientific Reports*, 10(1), 6045. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62827-w>
- Suiker, A. S. J., & De Borst, R. (2003). A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 57(4), 441-470. <https://doi.org/10.1002/nme.683>
- Tsuji, Y., Tanaka, T., & Ishida, T. (1992). Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe. *Powder Technology*, 71(3), 239-250. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(92\)88030-L](https://doi.org/10.1016/0032-5910(92)88030-L)
- Zhang, X., Zhao, C., & Zhai, W. (2017). DEM Analysis of Ballast Breakage Under Train Loads and Its Effect on Mechanical Behaviour of Railway Track. In X. Li, Y. Feng, & G. Mustoe (Eds.), *Proceedings of the 7th International Conference on Discrete Element Methods* (Vol. 188, pp. 1323-1333). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1926-5_136
- Zhu, H. P., Zhou, Z. Y., Yang, R. Y., & Yu, A. B. (2007). Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments. *Chemical Engineering Science*, 62(13), 3378-3396. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.12.089>



ANEJOS

ANEJO N°1: Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) fueron establecidos por las Naciones Unidas en 2015 con la meta de erradicar la pobreza, preservar el medio ambiente y asegurar que todas las personas gocen de paz y prosperidad para el 2030. En total fueron establecidos 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible y la mayoría de las naciones a nivel mundial los han incluido en sus políticas como parte de la Agenda 2030. Todos estos objetivos establecen metas específicas cuya consecución en conjunto asegura la realización del objetivo determinado. Aquí se presenta la conexión entre este documento y los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Agenda 2030.

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	GRADO DE RELACIÓN			
	<i>Alto</i>	<i>Medio</i>	<i>Bajo</i>	<i>N/P</i>
ODS 1. Fin de la pobreza				
ODS 2. Hambre cero				
ODS 3. Salud y bienestar				
ODS 4. Educación de calidad				
ODS 5. Igualdad de género				
ODS 6. Agua limpia y saneamiento				
ODS 7. Energía asequible y no contaminante				
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico				
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras				
ODS 10. Reducción de las desigualdades				
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles				
ODS 12. Producción y consumo responsables				
ODS 13. Acción por el clima				
ODS 14. Vida submarina				
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres				
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas				
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos				

ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras

Una ventaja clave del modelo de comportamiento del balasto es la adquisición de datos importantes sobre él, los cuales anteriormente no eran accesibles experimentalmente o eran difíciles y poco confiables de obtener. Entender a fondo cómo se comporta la capa de balasto ayuda a diseñar la banqueta de balasto según las cargas que soportará, disminuyendo los riesgos por falta de información y logrando infraestructuras ferroviarias más confiables, resistentes y de alta calidad que faciliten la conectividad territorial y la sostenibilidad en el transporte.

ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles

En ciudades cada vez más densamente pobladas, el ferrocarril metropolitano adquiere más relevancia por su capacidad y sostenibilidad, por lo que es crucial comprender el comportamiento del balasto en las vías férreas para mejorar la infraestructura a través de una planificación basada en su modelo de comportamiento.

ODS 12. Producción y consumo responsables

Entender cómo se comporta el balasto es clave para transportarlo, suministrarlo y utilizarlo de manera eficaz, disminuyendo la pérdida de recursos al emplearlos de forma eficiente y promoviendo un mantenimiento predictivo que garantice inversiones adecuadas. Mejorar la calidad del balasto también influye en la durabilidad de los demás elementos de la infraestructura y en el desgaste reducido del material rodante que transita por ella. Además, comprender el comportamiento de esta capa permite realizar pruebas con la integración de diferentes materiales que impulsen una economía circular.

ODS 13. Acción por el clima

Se reconoce al tren como una de las formas de transporte más respetuosas con el medio ambiente, tanto para pasajeros como para carga. La mayoría de las conexiones ferroviarias en el mundo emplean balasto como soporte para las traviesas y cada vez se usan más vías de ancho mixto por sus grandes ventajas y versatilidades. La modelización numérica del comportamiento del balasto impulsa el diseño y la gestión de las vías ferroviarias en la transición hacia la movilidad verde sin emisiones de gases de efecto invernadero.

ANEJO N°2: Plano de la traviesa AM-05

